

VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Hornicko-geologická fakulta

Institut ekonomiky a systémů řízení

**Perspektiva jaderné energie a zhodnocení
environmentálních rizik**

Prospects for Nuclear Energy and Assessment of Environmental Risks

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce:

Datum zadání:

Datum odevzdání:

Ostrava 2011

prof. Ing. Vojtěch Dirner, CSc.

říjen 2010

duben 2011

Bc. Tat'ána Vrbová

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 - školní dílo
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst.3)
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše)

V Mostě dne

Obsah

1. Úvod	1
2. Jaderné havárie - příčiny, následky, sanace	3
2.1 Jaderná energie	3
2.1.1 Vznik jaderné energie, historie jaderných elektráren	3
2.1.2 Základní pojmy energetiky a jaderné fyziky	4
2.1.3 Typy jaderné energie	5
2.1.4 Součásti reaktorů	7
2.2 Jaderné havárie	9
2.2.1 Černobyl	9
2.2.2 Fukušima	14
3. Porovnání havárií v jaderné energetice a nejaderné energetice	17
3.1 Uhelná elektrárna	17
3.2 Důlní neštěstí	18
3.2.1 Dukla v Havířově-Suché	18
3.2.2 Důlní neštěstí v Honkeiko- Čína	19
3.3 Ropná havárie	22
3.3.1 Válka v Iráku (Kuwait)	23
3.3.2 Havárie ropné plošiny Deepwater Horizon společnosti BP v Mexickém zálivu	24
3.4 Zhodnocení negativních environmentálních vlivů nejaderných elektráren	25
3.5 Zhodnocení dopadu jaderných elektráren na životní prostředí	27
4. Nové reaktory IV. Generace	28
4.1 Generace v jaderné energetice	28
4.2 Technologické požadavky na vývoj reaktorů IV. Generace	33
4.3 Reaktory s velmi vysokou teplotou	34
4.4 Reaktory využívající vodu v superkritické fázi	36
4.5 Reaktory založené na roztavených solích	37
4.6 Rychlé reaktory chlazené plynem	40
4.7 Rychlé reaktory chlazené sodíkem	40
4.8 Rychlé reaktory chlazené olovem	41
5. Návrhy a doporučení	42
5.1. Vyhořelé palivo jako surovina	43
5.2 Prevence havárií	45

6. Závěr.....	46
---------------	----

Anotace

Práce se zaměřuje na výrobu elektrické energie v jaderných elektrárnách a posouzení environmentálních rizik spojených s touto výrobou.

První část práce obecně popisuje historii, vznik a typy jaderné energie a charakterizuje havárie jaderných elektráren v Černobylu a Fukušimě. Druhá část obsahuje popis neštěstí v dolech a ropné havárie, zhodnocení negativních vlivů jaderných a nejaderných elektráren na životní prostředí. Třetí část je zaměřená na trendy spojované s budoucím vývojem jaderné výroby elektřiny, na reaktory IV. Generace.

Z práce vyplývá, že jaderná energie má v porovnání s ostatními zdroji energie velký potenciál do budoucna.

Annotation

This dissertation is aimed at production of nuclear energy and at consideration of environmental risks and hazards that arise from this production.

The first part generally describes the history, the rise and different types of the nuclear energy and describes as well the nuclear incidents in Chernobyl and in Fukushima.

The second part contains descriptions of incidents in mining and oil production and evaluates negative impacts of both nuclear and non-nuclear energy production on the environment.

The third part focuses on future trends in the production of the nuclear energy, especially on reactors of the IV. generation. Conclusion of my thesis is that there is a large potential in nuclear energy in comparison with other energy sources.

1. Úvod

Téma této diplomové práce zní „Perspektiva jaderné energie a zhodnocení environmentálních rizik.“ Na toto téma jsem se rozhodla zaměřit z důvodu velmi dnes diskutovaného problému vyčerpatelnosti neobnovitelných zdrojů energie. Především v médiích se mluví o povolení překročení limitů těžby hnědého uhlí. A tak jsem si položila otázku „Pokud se vyčerpají všechny zdroje uhlí a ostatních fosilních paliv, bude je v budoucnosti moci nahradit tolik obávaná jaderná energetika?“

Význam problematiky výroby elektrické energie je díky její stálé se zvyšující spotřebě celosvětový a naprosto zásadní pro další fungování lidské společnosti. Rostoucím počtem obyvatel spotřeba rychle stoupá a ještě dlouho poroste.

Podle světové rady pro energii (WEC) se celosvětová spotřeba zdrojů elektřiny během příštích 25 let zdvojnásobí, což způsobí zvýšení emisí CO₂ až o 100%. [19] Přesto trendem dnešní doby je snižování emisí do ovzduší, protože množství CO₂ vypouštěné elektrárnami na fosilní paliva do ovzduší způsobuje tzv. skleníkový efekt a následně globální oteplování.

Z tohoto důvodu se jeví jaderná energetika mnohem šetrnější k životnímu prostředí. V mnoha zemích námitky veřejnosti vůči jaderné energii pramení z obav o bezpečnost jaderných reaktorů a také s jejím spojením s jadernými zbraněmi. S tím souvisí i problém dlouhodobého ukládání radioaktivních odpadů a hrozba jaderných katastrof.

Určitá rizika zahrnují všechny využívané formy energie. Tyto dělíme na obnovitelné, ekologicky přijatelné a zdroje neobnovitelné, ekologicky problematické.

Mezi obnovitelné zdroje patří sluneční energie, vodní energie, větrná energie, energie biomasy, geotermální energie a energie přílivová. Zdroje neobnovitelné jsou fosilní paliva, uhlí, ropa, zemní plyn, uran a thorium.

Energie z fosilních paliv patří mezi hlavní zdroj. Od samého počátku byla výroba elektrické energie závislá na spalování uhlí a později na spalování ropných

produktů a zemního plynu. Uhlé elektrárny se dodnes podílejí na světové výrobě elektřiny.

Vodní elektrárny jsou známé už mnoho let. Voda se začala využívat pro získávání elektrické energie koncem dvacátého století. Vůbec první komerčně využívaná vodní elektrárna byla postavena Thomasem A. Edisonem u řeky Fox River v Appletonu ve Wisconsinu v USA. Dnes převládá ve výrobě elektrické energie z alternativních zdrojů využití vodních elektráren, protože jsou ekonomicky i ekologicky velmi efektivní. Vodní turbíny mají účinnost až 95%.

Větrné elektrárny jsou ze všech obnovitelných zdrojů nejlevnější a nejčistší, jsou s nimi ale spojené problémy s umístěním samotných elektráren.

Solární energie má ohromný potenciál, je čistá a v budoucnu bude snad i levná.

Spalování biomasy je důležité pro výrobu tepelné energie, ale především představuje možnost náhrady fosilních paliv v dopravě. Emise z biomasy jsou nízké ve srovnání s fosilními palivy.

V práci jsem se zaměřila na porovnání rizik získávání energie jaderným a nejaderným způsobem. Jelikož je tato oblast předmětem neustálého vývoje, budu vycházet především z internetových zdrojů a aktuálních zpráv mezinárodních organizací. Jako významný zdroj z této oblasti poslouží otevřená internetová encyklopedie Wikipedia, respektive zdroje v ní citovány.

2. Jaderné havárie - příčiny, následky, sanace

2.1 Jaderná energie

2.1.1 Vznik jaderné energie, historie jaderných elektráren

Roku 1932 byl objeven neutron. Frederic a Irene Joliet-Curie roku 1934 objevili indukovanou radioaktivitu, transmutaci jader atomů pomocí neutronů. Enrico Fermi pokračoval v experimentech, mimo jiné s uranem. Roku 1938 tým okolo Otto Hahna opakoval a reinterpretoval Fermiho experimenty; bylo zjištěno, že atomy uranu mohou být rozštěpeny na dvě skoro stejné poloviny - velký rozdíl oproti původním pozorováním, kdy docházelo jen k malým změnám ve složení jádra. Bylo jasné, že pokud by při štěpení byly uvolňovány další neutrony, mohlo by být dosaženo řetězové reakce, kdy rozštěpená jádra produkují neutrony, které štěpí další jádra, za současného uvolňování velkého množství energie.

V několika zemích, včetně USA, Velké Británie a Německa, vědci žádali své vlády o podporu dalšího výzkumu. Částečného úspěchu bylo dosaženo v Německu a v USA. Německý jaderný program však trpěl nedostatkem investic a emigrací židovských fyziků. Americký program, přes počáteční nedostatek investic, se rozvíjel mnohem lépe.

2. prosince 1942 dosáhl Enrico Fermi se svým týmem první řízené řetězové štěpné reakce v grafitem moderovaném reaktoru umístěném pod tribunou stadionu chicagské univerzity. Reaktor byl nazván CP-1, Chicago Pile 1.

Další, větší a méně improvizované, reaktory byly vybudovány v Hanfordu ve Washingtonu za účelem produkce plutonia (a radionuklidů) pro vývoj a konstrukci jaderných zbraní. Válka v Evropě však skončila dříve, bomby byly tedy použity pouze v Hirošimě a Nagasaki, za účelem ukončení války s Japonskem předtím, než by se do konfliktu mohl zapojit Sovětský Svaz a uplatňovat územní nároky.

Po ukončení války s Japonskem pokračovala produkce jaderných zbraní i nadále. Souběžně s tím byly zahájeny první pokusy o komercializaci jaderné energie.

Koncem roku 1949 byla zahájena konstrukce reaktoru EBR-I, experimentálního množivého reaktoru číslo 1, v Idahu. Jeho role byla ověřit, zda reaktor může produkovat vlastní palivo. 24. srpna 1951 reaktor zahájil provoz. 20. prosince 1951

byla z reaktoru získána elektrická energie - byly rozsvíceny čtyři dvousetwattové žárovky. O den později již reaktor produkoval dostatek energie pro provoz celé budovy. Jeho termální výkon byl 1.4 MW a jeho elektrický výkon byl 100-200 kW.

Roku 1953 byl poblíž EBR-I postaven reaktor BORAX-I, jehož účelem bylo ověřit, že varné reaktory mohou být praktické. Experiment byl úspěšný. O rok později byl reaktor zničen při úmyslně destruktivním testu, který měl zjistit, jak proběhne jeho selhání; namísto roztavení několika palivových desek ale došlo k roztavení významné části jádra a k explozi reaktoru s následnou kontaminací 7800 metrů čtverečních okolí. Výsledky pomohly zpřesnit modely pro výpočty chování reaktorů.

17. června 1954 byla v Sovětském svazu připojena k rozvodné síti jaderná elektrárna Obninsk, první jaderná elektrárna na světě, dodávající 6 megawattů elektrické energie. Její reaktor byl předchůdcem reaktorů typu RBMK. Výstavba elektrárny začala roku 1951.

Roku 1954 byl postaven reaktor BORAX-II, ke kterému byla později přidána turbína a byl přejmenován na BORAX-III. 17. července 1955 reaktor vyprodukoval výkon 2 megawatty a po dobu jedné hodiny zásoboval elektřinou laboratoř i blízké město Arco, které se tím, byť jen na hodinu, stalo prvním městem v dějinách, které plně pokrylo svoji spotřebu elektrické energie jadernou energií. O rok později byl uveden do provozu BORAX-IV s termálním výkonem 20 MW, který jako palivo používal uran 233, který byl v tom samém reaktoru produkován z thoria 232 (tzv. thoriový cyklus).

2.1.2 Základní pojmy energetiky a jaderné fyziky

Energie je v energetických materiálech ukryta v různých fyzikálních formách. Pro její uvolnění je třeba, aby vnitřní energie výchozího stavu materiálu byla vyšší, než energie stavu konečného. V případě paliv jde o energii chemických vazeb (definovanou jako energie potřebná k rozštěpení příslušné chemické vazby); rozdíl mezi součtem energie vazeb molekul paliva a okysličovadla (obvykle vzduchu) a součtem energie vazeb produktů spalování je uvolněn jako tepelná energie (obvykle různými mechanismy převáděná na mechanickou práci). V případě energie vodní či větrné je využívána kinetická energie pohybující se vody či

vzduchu. Energie jaderná má formu vazebných energií nukleonů (protonů a neutronů, z nichž se skládá atomové jádro).

Různé prvky mají různou energii vazeb v přepočtu na jeden nukleon. Stejně jako u chemických reakcí, energie uvolněná (nebo spotřebovaná) během reakce jaderné je rovna rozdílu mezi součtem vazebných energií nukleonů před a po reakci. Jaderná energetika je založena na uvolňování této energie.

2.1.3 Typy jaderné energie

Vazebná energie nukleonů se uvolňuje třemi způsoby: spontánním radioaktivním rozpadem nestabilních izotopů, slučováním jader lehkých prvků (jadernou fúzí), nebo štěpením jader štěpitelných izotopů (typicky řetězovou reakcí).

Energie radioaktivního rozpadu

Nestabilní izotopy podléhají spontánnímu rozpadu, jehož rychlost je pro daný izotop konstantní. Rozeznáváme dva hlavní typy jaderného rozpadu: alfa a beta. Alfa rozpad je charakteristický zejména pro těžká jádra; jádro vypudí alfa částici (jádro helia-4) a promění se na jádro o dva protony a dva neutrony lehčí. Beta rozpad má dva typy: beta+ a beta-. Při obvyklejším beta- rozpadu jádro vyzáří beta částici (elektron) a promění se na izotop o jeden neutron chudší a jeden proton bohatší (neutron se změní na proton). Při méně obvyklém beta+ rozpadu jádro vyzáří pozitron (antičástici elektronu) a promění se na izotop o proton chudší a elektron bohatší.

Produkt radioaktivního rozpadu může a nemusí být stabilní. V případě nestabilního produktu se tento dále rozpadá. Sekvence jaderných rozpadů, končící stabilním izotopem, se nazývá rozpadová řada.

Rychlost rozpadu izotopu je udávána jako jeho poločas rozpadu - doba, za kterou se rozpadne polovina jeho jader. Izotopy mohou být klasifikovány dle svého poločasu jako krátkodobé, střednědobé a dlouhodobé. Jelikož produkce energie v materiálu je rovna součinu počtu rozpadů za časovou jednotku a energie uvolněné jednotlivým rozpadem, snadno vidíme souvislost mezi poločasem rozpadu a energetickým výkonem materiálu.

Některé izotopy se používají jako tepelný zdroj, ať už samostatně (radioizotopové vyhřívací jednotky, např. na udržení kosmických sond na provozní teplotě) nebo v kombinaci s termočlánky jako zdroj elektrické energie (radioizotopové termoelektrické generátory).

Vhodnými izotopy pro radioizotopové zdroje jsou ty se snadnou dostupností, vysokou energií uvolněnou při rozpadu (alfa rozpad typicky uvolní řádově vyšší množství energie než beta rozpad), vhodným poločasem rozpadu (příliš krátký by zapříčinil nízkou životnost zdroje, příliš dlouhý by nevyprodukoval dostatečné množství energie z rozumného množství materiálu) a snadno odstínitelným zářením (pokud možno pouze alfa, nebo alespoň jen nízkoenergetické gama). Volba konkrétního izotopu závisí na technických omezeních pro daný typ generátoru; zda je kritická velikost (např. pro kardiostimulátory), hmotnost (pro kosmické sondy) nebo cena (pro průmyslová použití).

Nejčastější izotopy používané pro generátory jsou Plutonium 238, Polonium 210, Stroncium 90, Americium 241, Radium 226, Promethium-145 a Tritium.

Energie jaderné fúze

Lehká jádra mohou uvolňovat energii slučováním do těžších jader. K překonání odpuzování jader je však potřeba mnoho energie, k fúzní reakci je tedy zapotřebí dosáhnout vysoké hustoty a teploty plazmatu. Fúzní energie je v praxi využívána jen v termojaderných zbraních, kde je potřebných podmínek dosaženo za pomoci exploze štěpné jaderné nálože. Jaderná fúze je zkoumána pro potřeby energetiky; v současnosti probíhá stavba experimentálního termojaderného reaktoru ITER.

Energie jaderného štěpení

Nejbohatším v současnosti využívaným zdrojem jaderné energie je jaderné štěpení. Energie je uvolňována z velmi těžkých jader vhodných izotopů, které se po pohlcení neutronu o vhodné energii rozpadají na lehčí fragmenty a v některých případech i další neutrony. Na rozdíl od energie radioaktivního rozpadu, která je neřiditelná, je rychlost uvolňování energie jaderného štěpení ovladatelná pomocí intenzity toku neutronů.

Ne každý uvolněný neutron působí další štěpení. Některé mohou uniknout z aktivní zóny reaktoru. Jiné jsou pohlceny neštěpitelným jádrem. Jen některé vyvolají rozštěpení zasaženého jádra. Poměr neutronů z jednoho štěpení, které vyvolají další štěpení, se označuje jako "efektivní neutronový multiplikační faktor", "k".

Biochemické vlastnosti izotopů jsou důležité pro jejich chování v organismu a biosféře obecně. Některé mohou podléhat bioakumulaci (např. v houbách, některých rostlinách a živočiších). Některé se z potravy a vody absorbují lépe, než jiné. Po absorpci do organismu pak některé (např. stroncium-90) díky své chemické podobnosti s vápníkem bývají zabudovány v kostní tkáni, a zůstávají dlouhodobě. Jiné jsou relativně rychle vylučovány; např. cesium-137, chováním podobné draslíku, se akumuluje většinou ve svalové tkáni a je vylučováno ledvinami, jak je postupně nahrazováno draslíkem z potravy; jeho biologický poločas (doba, kdy se z organismu vyloučí polovina obdrženého množství) je asi tři měsíce. Izotopy s tendencí k bioakumulaci dávají organismu vyšší celkovou dávku, než ty, které se rychle vylučují. [1]

2.1.4 Součásti reaktorů

Palivo

Zdrojem energie v reaktoru je jaderné palivo. Toto má obvykle formu tenkých prutů, složených blízko u sebe do palivových kazet. Pruty jsou složeny z pláště ("cladding") a vlastního štěpného materiálu.

Plášť musí být odolný vysoké teplotě a korozi, vydržet kontakt s horkým palivem, štěpnými produkty a chladičem, být dlouhodobě odolný korozi (kvůli skladování vyhořelého paliva v chladících bazénech), nepodléhat zhoršování vlastností při expozici intenzivnímu toku neutronů, neabsorbovat neutrony, a bez deformací snést vysoký vnitřní tlak, neboť některé štěpné produkty jsou plynné. Plášť také plní roli ochranné bariéry proti úniku štěpných produktů z paliva. V současnosti nejobvyklejším materiálem používaným pro plášť palivových tyčí a strukturálních komponent aktivní zóny jsou slitiny zirkonia, zbaveného hafnia a legovaného malým množstvím cínu nebo niobu pro zlepšení mechanických vlastností. Dalším materiálem, někdy používaným, jsou některé nerezové oceli.

V nyní zastaralých reaktorech Magnox se používá slitina hořčíku; tato však omezuje maximální bezpečnou teplotu reaktoru a koroduje při skladování vyhořelého paliva.

Jako štěpný materiál se obvykle využívá uran 235. Některé typy reaktorů umožňují operovat s přírodním, neobohaceným uranem; k tomu je však zapotřebí minimalizovat ztráty neutronů volbou vhodného moderátoru. Většinou je ale potřeba určitá úroveň obohacení. Dá se využít i plutonium, ať už samostatně v příslušném typu reaktoru, nebo ve směsi s uranem ve formě MOX (Mixed OXide). Pozornost si získává i uran 233, který se dá produkovat v rychlých reaktorech z thoria 232, jehož jsou v přírodě bohaté zásoby.

Moderátor

Neutrony vzniklé štěpením jádra jsou pro běžné typy reaktorů příliš rychlé. Pro zvýšení pravděpodobnosti jejich zachytu jádrem paliva je nutno je zpomalit. K tomu se používá moderátor.

Moderátor může být pevný nebo kapalný. Používá se několik běžných moderátorů:

Grafit: pevný materiál. Umožňuje použití neobohaceného uranu. Pro jaderné účely musí být velmi čistý, nečistoty by způsobovaly absorpci neutronů a znemožňovaly dosažení řetězové reakce při použití neobohaceného paliva. Existují i reaktory, které moderátor nepotřebují a operují s rychlými neutrony. Tyto mají své výhody a nevýhody. K výhodám patří podstatně vyšší stupeň vyhoření paliva (a tedy vyšší účinnost), podstatně nižší dlouhodobá radioaktivita vyhořelého paliva (snížený obsah aktinoidů s dlouhým poločasem rozpadu), a možnost transmutace uranu 238 a thoria ve štěpitelný materiál (plutonium, uran 233). Nevýhodami, díky jimž jsou rychlé reaktory zatím neekonomické, jsou mimo jiné velmi rychlá odezva reaktoru na vlivy (a tedy obtíže s řízením a stabilizací pomocí regulačních tyčí, které jsou příliš pomalé), náročnost na konstrukční materiály díky mnohem vyšším tokům neutronů (viz vliv neutronového záření na materiály popsány výše), a ostatní technické zvláštnosti, např. u některých reaktorů použití roztavených alkalických kovů jako chladicího média.

2.2 Jaderné havárie

2.2.1 Černobyl

Definice jaderné havárie v jaderné elektrárně

Jaderná havárie v jaderné elektrárně je havárie, při které dojde k:

- porušení těsnosti obalu jaderného paliva v aktivní zóně jaderného reaktoru
- úniku radioaktivních látek do chladiva či moderátoru (deuterium, plyn, sodík)
- úniku této radioaktivní směsi netěsnostmi z primárního okruhu do prostoru reaktorového bloku.
- úniku této radioaktivní směsi netěsnostmi z reaktorového bloku do okolí elektrárny resp. do životního prostředí [21]

Nejznámější historickou havárií v dějinách jaderné energetiky je havárie v černobylské jaderné elektrárně. Elektrárna měla čtyři bloky, každý s varným reaktorem RBMK-1000 s tepelným výkonem 3200 MW a elektrickým výkonem 1000 MW, realizovaným dvojicí vodíkem chlazených 500 MW turbogenerátorů. Stavba elektrárny a zaměstnaneckého města Pripjať byla zahájena roku 1970. Bloky elektrárny byly uvedeny do provozu v letech 1977, 1978, 1981 a 1983, dva další bloky byly rozestavěné. Bloky 3 a 4 byly vybaveny reaktory RBMK druhé generace, s o něco bezpečnější konstrukcí; nastala-li by havárie na bloku 1 nebo 2, místo bloku 4, mohly být následky horší.

Na 25. dubna 1986 byl naplánován test bezpečnosti bloku 4. Jaderný reaktor je po odstavení třeba chladit, kvůli nutnosti odvodu tepla z rozpadu radionuklidů, vzniklých štěpením paliva. K tomu je potřeba elektrická energie. Pro zajištění bezpečného chodu po odstávce je tedy nutná dodávka elektrické energie pro chladicí pumpy. (U modernějších reaktorů s bezpečnější konstrukcí zohledňující tuto nutnost chlazení již tento požadavek není tak nutný.) V černobylské elektrárně se tato energie dala získat z ostatních bloků, ze dvou vnějších vedení připojených k elektrárně, nebo z dieselgenerátorů. Dieselgenerátory však potřebují nějaký, i když krátký, čas pro náběh. Tento čas by mohl být pokrytý dodávkou energie z generátoru, poháněném setrvačností rotoru turbíny a generátoru. Ke zjištění, jakou rychlostí bude dodávka energie klesat po zastavení přívodu páry do turbín a zda bude stačit pro potřebných prvních 60-75 sekund, byl nutný experiment.

Dalším problémem v bloku 4 byl jeho druhý turbogenerátor, číslo 8, modernizovaná verze, lehčí ale náchylnější na vibrace. S vibracemi byly na turbíně neustálé problémy, natolik závažné, že na jednom z ložisek způsobily vznik trhliny. Charkovský závod, který turbínu dodal, roku 1985 pořídil ze Švýcarska za valuty mobilní laboratoř pro měření vibrací - dodávku Mercedes plnou počítačů a senzorů. Tato byla vyslána spolu s týmem tří techniků a řidiče do černobylské elektrárny za účelem pomoci s problémem s ložiskem. Její přítomnost na místě byla časově omezená. Při odstavení turbíny se tato postupně zpomaluje a prochází skrze celé spektrum otáček, čímž mají různé vibrační módy šanci se projevit a být změřeny; odstávka tedy byla nutná v naplánovaném termínu i z tohoto důvodu - bez naměřených dat by se problém s vibracemi odstraňoval špatně a v jiném termínu už by vibrolaboratoř nebyla k dispozici.

Test měl proběhnout společně s plánovanou odstávkou reaktoru za účelem údržby. Podobné testy generátoru byly provedeny již dříve, ale s negativním výsledkem; energie nebyla produkována po dostatečně dlouhou dobu. Po každém testu byly provedeny změny na generátoru a jeho budiči, žádná z nich však zatím nebyla dostačující.

Plán testu byl snížit výkon reaktoru na 700-800 MW termálního výkonu, roztočit turbínu na pracovní otáčky, uzavřít přívod páry a zaznamenávat charakteristiky generátoru. Reaktor měl být v okamžiku uzavření parovodu odstaven. Test měla provést denní směna, s vyškolenými a instruovanými pracovníky; úkolem následující směny měl být pouze dohled na chladicí systémy odstaveného reaktoru.

25. dubna v 1:06 v noci bylo zahájeno snižování výkonu reaktoru; začátkem ranní směny byl výkon již na polovině maxima. Pak došlo k neplánované odstávce na jedné z regionálních elektráren a přenosové soustavě hrozil nedostatek elektřiny; další snižování výkonu bylo tedy pozastaveno na žádost dispečera přenosové sítě. Test byl tedy přeložen na noc; dispečer povolil pokračování snižování výkonu ve 23:04 a během předávání směn z večerní na noční byla noční směna krátce proškolená a výkon reaktoru byl nestandardně rychle snížen z 50% maxima na nižší hodnotu.

Reaktory ale mají jednu záludnost - xenonovou otravu (xenon poisoning), v ruštině zvanou jódomá jáma. Jedním z běžných štěpných produktů je jód 135. Tento se postupně rozpadá na xenon 135, který je nejsilnějším známým absorbérem neutronů vůbec. Tento je možno buďto spálit v reaktoru (jeden pohlcený neutron zneškodní jeden atom Xe-135), nebo počkat, až se s poločasem něco přes 9 hodin rozpadne sám. Jelikož produkce I-135 je úměrná výkonu reaktoru, produkce xenonu úměrná množství přítomného jódu, a odbourávání xenonu úměrné výkonu reaktoru, reaktor má "setrvačnost" - při snížení výkonu zasunutím regulačních tyčí se výkon reaktoru chvíli snižuje i nadále, zatímco při jeho zvýšení vysunutím tyčí jeho výkon bude ještě po nějakou dobu stoupat. S touto nestabilitou je třeba umět počítat.

Požadovaný termální výkon 700 MW byl dosažen 26. dubna v 0:05 ráno. Díky xenonové otravě ale výkon reaktoru klesal i nadále. Při výkonu 500 MW operátor reaktoru omylem zasunul tyče příliš hluboko a výkon reaktoru prudce klesl pod 30 MWt - hluboko pod bezpečnou hranici. Odstavit reaktor v tomto okamžiku by znemožnilo provedení plánovaného testu. Směnoví technici byli pod tlakem Anatolije Dyatlova zodpovědného za test, který byl zase pod tlakem ze strany vedení elektrárny, které potřebovalo provést test generátoru (pro uspokojení úřadu pro jadernou bezpečnost) i měření vibrací turbíny (pro odstranění problému). Obsluha se tedy rozhodla pokračovat a operátor na Akimovův rozkaz vysunul většinu regulačních tyčí, ponechávajíc jen několik tyčí, nutných pro stabilitu reaktoru. Po několika minutách výkon reaktoru začal neochotně stoupat a usadil se na 160-200 MW. Xenon, produkovaný z jódu nashromážděného během předchozí činnosti reaktoru, však působil další snižování výkonu, a palivo, již vyčerpané díky konci palivové kampaně reaktoru, mělo malou rezervu reaktivity. Ve snaze udržet výkon byly vysunovány další tyče.

Reaktor na takto nízkém výkonu byl díky své konstrukci silně nestabilní, teplota jádra a průtok chladiva se měnily. Hladina vody v bubnech separátoru páry se dostala mimo povolený limit, signál jejího alarmu byl potlačen obsluhou, jako i ostatní alarmy, vyjivší se mezi 0:35 a 0:45. Výkon reaktoru byl nakonec více méně stabilizován na asi 200 MW.

V 1:05 byly v rámci experimentu naplno spuštěny dvě zbývající chladicí pumpy. Průtok vody reaktorem vzrostl, jádro se ochladilo, tvorba páry klesla, zvýšil se průtok vody skrz separátory páry a zvýšil se podíl horké vody vracející se ze separátorů oproti množství chladnější vody z kondenzátorů páry; tím vzrostla teplota chladicí vody tekoucí do reaktoru. Zároveň pokleslo množství páry v reaktoru, tedy stoupla průměrná hustota směsi voda-pára v chladicích kanálech, příslušně narostla absorpce neutronů chladicí vodou, snížil se výkon reaktoru, a toto snížení bylo kompenzováno dalším vysunutím regulačních tyčí. V tomto okamžiku byl reaktor připraven ke katastrofě; i malý nárůst výkonu stačil na zvýšení teploty chladicí vody na bod varu, vznik velkého množství páry a tedy prudkého poklesu absorpce neutronů chladicí vodou a tedy prudkého nárůstu výkonu reaktoru. Díky vysoké počáteční teplotě by se navíc voda neodpařovala postupně ale příliš rychle, což by způsobilo vznik izolující vrstvy páry mezi vodou a palivovými tyčemi, což by dále omezilo jejich chlazení.

V 1:23:04 byl experiment spuštěn. Byl uzavřen přísun páry do obou turbín a nastalo jejich odstavování, spolu se čtyřmi z osmi chladicích pump. Dieselové generátory naběhly dle plánu a v 1:23:43 převzaly napájení pump. Pokles výkonu pump během zpomalování turbogenerátoru způsobil pokles průtoku chladiva reaktorem, což způsobilo nárůst vývinu páry a výkonu reaktoru. Automatický systém však změny úspěšně kompenzoval zasouváním regulačních tyčí.

V 1:23:40 dle záznamů řídicího systému SKALA obsluha reaktoru stiskla tlačítko nouzového odstavení reaktoru. Není jasné, zda toto bylo provedeno za účelem rutinního odstavení reaktoru, nebo zda se již proces destrukce reaktoru rozběhl. V tomto okamžiku však začalo simultánní zasouvání všech regulačních tyčí do jádra reaktoru, automatických i manuálních.

O několik sekund později, jak grafitové displacery na špičkách regulačních tyčí procházely jádrem reaktoru, všechny nebo skoro všechny ve stejné výšce a relativně pomalu, způsobilo lokální snížení absorpce neutronů displacery lokální nárůst výkonu. Díky velmi malé zbývající rezervě v operačních parametrech reaktoru, v tomto okamžiku již nějakou dobu mimo bezpečný rozsah parametrů, byl nárůst výkonu velmi rychlý a masivní; během tří sekund dosáhl 530 MW. Voda

v tlakových kanálech se prudce uvedla do varu, kanály se zdeformovaly a některé popraskaly, grafitové bloky v jejich okolí se posunuly a zdeformovaly kanály pro regulační tyče, a tyto se zasekly ve třetině své cesty skrz reaktor. Výkon reaktoru dále prudce rostl; poslední záznam na přístrojích byl 33 gigawattů, přes desetinásobek maximálního termálního výkonu.

Nárůst tlaku v reaktoru přesáhl meze jeho pevnosti. Pára unikající z potrhaných tlakových kanálů roztrhla tlakovou nádobu reaktoru, nadzdvihla dvoutisící tunový betonový biologický štít a utrhla i zbývající tlakové kanály. Zbylá chladicí voda se vylila do prostoru reaktoru a okamžitě se vyvařila. Ztráta vody způsobila další nárůst produkce tepla a již nebylo nic, co by mohlo efektivně udržovat teplotu paliva. O dvě až tři sekundy později došlo ke druhé, razantnější explozi.

Existuje několik hypotéz, co se stalo - nejznámější je exploze vodíku vzniklého reakcí páry s rozžhaveným zirkoniem z palivových tyčí. Podle poměru izotopů xenonu uvolněných při havárii se nejpravděpodobnější variantou jeví velmi intenzivní nárůst výkonu díky nadkritické konfiguraci reaktoru, tzv. jaderná exkurze (nuclear excursion). Tato konfigurace byla omezena jen na malou část reaktoru, ale i tak byla uvolněná energie ekvivalentní explozi asi 10 tun TNT. Valerij Iljič Chodemčuk, operátor hlavních cirkulačních pump, zemřel v tomto okamžiku; jeho tělo, pohřbeno pod troskami sálu chladících pump a bubnu separátorů páry, nebylo nikdy nalezeno.

Druhá exploze zničila vrchní část reaktorové budovy a rozmetala část reaktoru po blízkém okolí. Poškození budovy umožnilo volný průchod vzduchu rozžhavenými zbytky reaktoru; došlo k zapálení grafitových bloků a následující oheň po mnoho dní uvolňoval do vzduchu radionuklidy.

Rozsah havárie nějakou dobu nebyl jasný ani obsluze reaktoru. Přístroje pro měření radiace, které byly v daném okamžiku po ruce, neměly dostatečný rozsah, indikovaly maximální intenzitu záření jen do asi 0.036 Sv/h. Přístroje s vyšším rozsahem byly jen dva, jeden nedostupný v důsledku zasypání skříně troskami, druhý selhal při pokusu jej zapnout. Informace o intenzitě záření "něco přes 36 mSv/h" spolu s důvěrou v konstrukci reaktoru, považovanou za robustní, vedly k podcenění situace. Akimov trval na tom, že reaktor není poškozen, a odmítl věřit

údajům dozimetru přineseného o několik hodin později s tím, že jde o vadný přístroj.

Druhou obětí exploze byl Vladimir Nikolajevič Šašenok, technik podniku Atomenergonaladka, dohlížečící na manometry chladicího systému reaktoru. Byl nalezen na svém stanovišti pod troskami, v bezvědomí a těžce popálený, zemřel o několik hodin později v nemocnici, aniž nabyl vědomí.

Snaha pracovníků se zaměřila na zabránění dalšího zhoršení následků nehody. Obsluha reaktoru se v rámci hypotézy o nevýznamném poškození reaktoru snažila za každou cenu udržet v chodu chladicí systémy a manuálně zasunout zaseklé regulační tyče. Technici v hale turbogenerátorů hasili požáry způsobené padajícími rozžhavenými troskami, přepouštěli mazací olej pro ložiska turbín do podzemních ohni odolných nádrží, vypínali elektrolyzéry a uzavírali přívody chladicího vodíku do generátorů. Díky jejich úsilí byl rozsah havárie relativně omezen. Dva ze tří techniků vibrolaboratoře dostali smrtelnou dávku záření během obhlídky situace. [18]

Požáry hořely i na střechách turbínové haly a reaktorové haly třetího bloku, který byl stále v provozu a dodával energii do rozvodné sítě. Jejich uhašení bylo prioritou pro hasičský sbor elektrárny i pro později přispěchavší hasiče z Pripjati. Mnozí byli vystaveni smrtelným dávkám radiace, někdy zbytečně.

Operátoři reaktoru, pod vedením managementu odmítajícího pochopit rozsah škod, se ještě následující den marně a zbytečně snažili o udržení přítoku vody do reaktoru. Tato snaha si vyžádala několik dalších životů v důsledku vystavení radiaci a způsobila zkratky v podzemních kabelových kanálech, společných všem čtyřem blokům, do kterých tato voda z poškozeného potrubí natekla.

2.2.2 Fukušima

Nejnovější havárií je havárie jaderné elektrárny v Japonsku a jak řekl Japonský premiér v médiích, jde o největší katastrofu od explozí atomových bomb v Hirošimi a Nagasaki. K neštěstí došlo následkem ničivé vlny tsunami, která po zemětřesení zasáhla 11. března 2011 severovýchod Japonska. V té době byly v provozu tři ze šesti reaktorů. Reaktory byly automaticky odstaveny a byl u nich zahájen proces dochlazování z důvodů bezpečnosti po zemětřesení. Čerpadla byla elektricky

napájena z nouzových dieselových generátorů, u kterých došlo po hodině provozu k výpadku následkem zaplavení areálu vlnou tsunami. Tím nastala nouzová situace, místní příslušné úřady zahájili preventivní opatření, a to evakuaci obyvatel v havarijní zóně dosahující asi 20 kilometrů. Na blocích 1,2,3 v důsledku nedostatečného chlazení a následného vypařování došlo k postupnému snižování chladicí vody v reaktorech. Poté se zvýšil tlak, který musel být kontrolovaně snižován otvíráním příslušných ventilů a tím došlo k zvýšení tlaku v sekundárním kontejnmentu. Tento tlak kontejnmentu prvního bloku byl snižován kontrolovaným odpouštěním vzduchu a vodní páry do atmosféry. Protože chladicí voda byla v kontaktu s palivem, vykazovala mírnou radioaktivitu. 12. 3. 2011 došlo v bloku 1 k explozi, která zničila stěny reaktorovny. Příčinou exploze byl pravděpodobně unik vodíku, který pronikl do prostoru mezi betonovou stěnou reaktoru a kontejnmentem. Dle zprávy agentury Reuters nebyl kontejnment poškozen takže neunikaly radionuklidy do okolí. [2]

O dva dny později, tj. 14.3.2011 došlo ke druhé explozi. Tento výbuch měl podobné důsledky jako první exploze. Poškodil budovu reaktoru, nikoliv jeho vnitřní obal. Dalším zásadním problémem bylo kritické přehřívání paliva, zaviněné nefunkčním chlazením. Technici se snažili chladit reaktor mořskou vodou a tím odvrátit hrozící porušení jeho obalu i přes to, že při použití mořské vody dojde k trvalému poškození reaktoru. Tento reaktor už nikdy nebude moci být uveden zpět do provozu. Slaná voda ho nenávratně poškodí.

Hned další den 15.3.2011 otřásl japonskou elektrárnou Fukušima I další dva výbuchy, takže celkem už elektrárna zažila čtyři exploze za čtyři dny. "Byla to exploze vodíku. Stále se snažíme zjistit příčinu a zatím nevíme, zda výbuch způsobilo poškození tlakové nádoby reaktoru," řekl agentuře Reuters krátce po výbuchu jeden z činitelů japonské agentury pro jadernou bezpečnost.

U reaktoru 4 navíc hořela nádrž s vyhořelým palivem a radioaktivita se dostala do ovzduší. V okolí zařízení okamžitě vzrostly hodnoty radiace. Po několika hodinách začaly opět klesat. Reaktoru 4 byl v době zemětřesení už odstavený, nebylo v něm palivo a neprobíhala tedy štěpná reakce. Požáry vypukly v prostoru bazénu s použitým palivem. [3]

Vyhořelé palivo, vytažené z reaktoru, se ale stále chladilo ve vodní lázni v prostoru reaktorové haly 4. Vyhořelé palivo obsahuje nejen uran, ale také jiné, exotičtější izotopy vznikající při štěpení (např. plutonium či americium). Tyto prvky ještě několik let po vytažení z reaktoru vytvářejí teplo. Proto nějakou dobu chladnou v bazénu, než se přesunou do meziskladu vyhořelého paliva mimo elektrárnu.

Bylo nasazeno asi tucet vodních děl japonské policie, ale kvůli nebezpečí radiace pro obsluhu, se nedostaly dost blízko k reaktorům. Vodní proud postižená místa vůbec nezasáhl.

Stejně tak průlety vrtulníků nebyly příliš úspěšné. Celkem se uskutečnily pouze čtyři, odborníci ovšem tvrdí, že aby měli smysluplný efekt, muselo by jich být několik desítek. Největší úspěch slavila armádní vodní děla. Ta dokázala na reaktor č. 3 nastříkat zhruba 30 tun vody. Vodní děla armádních strojů lze ovládat dálkově, a tak mohly přijet blíže bez nebezpečí pro obsluhu.

18. března 2011 z poškozené japonské jaderné elektrárny Fukušima 1 opět stoupal kouř. Technici se dál snažili zchladit reaktory kropením z vodních děl a pokoušeli se nouzově připojit chladicí systémy k elektrické síti. Japonští experti zvažovali zakonzervování reaktorů pískem a betonem jako v Černobylu. [22]

Podle mluvčího japonské vlády Jukio Edana největším nebezpečím zůstával reaktor 3, který na rozdíl od ostatních spaluje vysoce toxické plutonium. [23]

Organizace MAAE zvýšila stupeň vážnosti jaderné havárie ze čtyřky na pětku, což znamená, že dosáhla úrovně havárie na zařízení Three Mile Island v roce 1979. Stupnice MAAE má sedm stupňů.

21. 3. 2011 začal stoupat šedý kouř ze skladu vyhořelého paliva poblíž reaktoru 3, naštěstí nezvýšil úroveň radiace. Krátce před tím společnost Tepco potvrdila, že se jí podařilo připojit napájení elektrickým proudem ke všem šesti reaktorům. Jako poslední připojila reaktory tři a čtyři. Úřady ale tvrdily, že stále nemohou do chladicích systémů přivést dostatek energie a monitorovat vývoj. [24]

Vysoké hodnoty naznačují, že zřejmě dochází k prosakování radioaktivních látek do moře přímo z elektrárny. Možnost poškození jádra jednoho ze šesti reaktorů v sobotu připustila také společnost TEPCO, která elektrárnu provozuje.

26. března 2011 stoupla hodnota radioaktivního jódu v moři 1 250krát a překročila normální stav. Radioaktivní látka zřejmě prosakovala do vody přímo z elektrárny.

Japonská energetická společnost TEPCO pokračovala v pokusech zastavit prosakování radioaktivní vody z trhliny v reaktoru 2 porouchané atomové elektrárny Fukušima 1. Betonem se prasklinu utěsnit nepodařilo, firma místo něj zkoušela polymerní látky, ty by měly v poškozené části jímky absorbovat vodu a zabránit tak jejímu v úniku do moře. [25]

Odborníci ve Fukušimě pátrali, odkud voda z reaktoru uniká. Ke sledování použili dokonce koupelové soli, aby jim mléčně zabarvené proudění pomohlo vystopovat zdroj úniku. Vytvořili směs pilin a novinového papíru s polymery a cementem k uzavření praskliny v betonovém plášti reaktoru číslo 2.

Začali přečerpávat radioaktivní vodu z jaderné elektrárny Fukušima do moře, z důvodu možnit další chlazení reaktorů, což jim mělo umožnit a také omezit šíření radioaktivity.

Japonským odborníkům se podařilo 6.4.2011 unikání radioaktivní vody z druhého reaktoru zastavit díky použitím 1 500 litrů takzvaného tekutého skla, což je křemičitý písek upravený do podoby nanočástic a dalších látek. Firma Tepco se v současné době obává hlavně prvního reaktoru a možnosti další exploze vodíku. Technici proto vpraví do reaktoru dusík, který by měl reakci vodíku s kyslíkem zabránit. [4]

Mluvčí vlády Jukio Edano ale uvedl, že voda je asi stokrát více radioaktivní, než jsou povolené limity, a připustil, že vypouštění může mít výrazný dopad na oceán. [5]

3. Porovnání havárií v jaderné energetice a nejaderné energetice

3.1 Uhlíková elektrárna

Princip fungování uhlíkové elektrárny je založen na přeměně tepelné energie na mechanickou a mechanické na elektrickou. Vzniklé teplo spalované pomocí uhlí ohřívá vodu procházející trubkami uvnitř kotle a mění ji v páru. Tato pára pak proudí do turbíny, jejím lopatkám předá svou pohybovou energii a roztočí ji. Turbína je pevně spojena s generátorem, který roztáčí a přeměňuje mechanickou

energii na elektřinu. V elektrárenském generátoru rotuje elektromagnet, vinutí v němž se indukuje napětí a proud, je umístěno na statoru okolo něj. Soustrojí se otáčí rychlostí 3000 otáček za minutu. Vycházející pára z turbín je pak vedena do kondenzátoru, kde zkondenzuje. Z plynu se stane opět kapalina. Voda je vedena zpět do kotle a celý cyklus začne nanovo. Pára vyrobená v kotli se nevyužívá pouze k výrobě elektřiny. Slouží také k vytápění přilehlých obcí a měst.

Fyzikálním jevem, na němž je ve většině typů elektráren založena výroba elektrického proudu, je elektromagnetická indukce. Podle Faradayova zákona o elektromagnetické indukci se na koncích smyčky, která se otáčí v magnetickém poli, indukuje střídavé elektrické napětí. Uzavřeme-li obvod, prochází smyčkou střídavý elektrický proud. Platí, že čím rychleji vodičem v magnetickém poli pohybujeme, tím je indukované napětí větší.

Většina uhelných elektráren je uspořádána do tzv. výrobních bloků. Elektrárenský výrobní blok znamená samostatnou jednotku skládající se z kotle, turbíny a příslušenství, z generátoru, odlučovačů popílku, chladicí věže, blokového transformátoru a v novější době také z odsiřovacího zařízení. Zařízením, které může být společné několika blokům, je zauhlování, vodní hospodářství (přivaděče, čerpadla a chemická úprava vody), komín, pomocná zařízení k odběru popílku a odsiřování.

V České republice se nachází několik uhelných elektráren. Mezi ně patří Dětmarovice, Hodonín, Chvaletice, Ledvice, Mělník (II a III), Počerady, Poříčí, Prunéřov I a II, Tisová a Tušimice II.

3.2 Důlní neštěstí

3.2.1 Dukla v Havířově-Suché.

Mezi největší důlní katastrofu, která se udála v Čechách se stala na dolu Dukla v Havířově-Suché. Tato katastrofa se stala 7.7.1961 v odpolední směně, kdy v důsledku důlního požáru zahynulo 108 horníků. Co se týče počtu obětí je patří mezi největší neštěstí požár na Dole Marie v Příbrami. Zde zahynulo 310 horníků. Příčinou nehody byl požár ve vtažené jámě.

Obrovský požár vznikl u první pohonné stanice soustavy osmi pásových dopravníků. Souhrn celé řady nepříznivých okolností měl za následek tento katastrofální rozsah. [6] Hlavní a největší příčinou bylo podcenění nebezpečí. Pracovníci dolu, kteří zjistili zápach po pálící se pryži a nepátrali odkud přichází kouř a konečně dispečer a vedoucí likvidace havárie, kteří o této skutečnosti obdrželi hlášení sice zpožděně, ale neprovedli včas všechna nutná opatření k záchraně horníků.

Ani při vzniku tak velkého požáru, ani při stávajícím větrném systému nemuselo dojít ke ztrátám na životech, kdyby všichni lidé byli z ohrožených úseků včas odvoláni, tj. nejpozději po prvním zjištění kouře a kdyby se lidé pracující v 8. sloji ihned odebrali mimo dosah unikajících škodlivin. (Bylo zjištěno, že například napřed pečlivě ukládali nářadí!) Vážným nedostatkem byla i nedostatečná větrací síť. V kritickém dni pracovalo v postiženém úseku celkem 338 horníků. V 11. sloji 8 lidí s instruktorem a střelmistrem při dopravě žlabů., 11 horníků na úpravě hlavní třídy.

3.2.2 Důlní neštěstí v Honkeiko- Čína

26. dubna 1942 se stala v uhelném dole Honkeiko v Číně v provincii Manchuria největší důlní katastrofa při těžbě uhlí všech dob. Zahynulo zde 1527 horníků, většinou Číňanů a Korejců.

Po okupaci provincie Manchuria Japonskem v roce 1931 zde byla založena Manchurijská uhelná společnost, která měla prozkoumat zdejší bohatá uhelná ložiska. V roce 1938 byla tato společnost převzata pod zprávu Společnosti pro průmyslový rozvoj Manchurie, která podstatně zvýšila zdejší těžbu. V roce 1942 to činilo již 5,5 milionu tun uhlí za rok. Aby byl zajištěn potřebný personál, byli povoláni úředníci z Japonska, kteří zde působili ve čtyřletých obdobích. Většina ostatních zaměstnanců, kteří pracovali v podzemí, byli Číňané a Korejci. Společnosti pro průmyslový rozvoj Manchurie vlastnila mnoho dolů a mezi patřil i důl Honkeiko ležící na uhelném poli Penhsiku. Před Japonci tu už těžila Čína přes 60 let. Zdejší uhlí mělo výborné koksovací vlastnosti, což se hodilo Japoncům při jejich zvýšené válečné poptávce po oceli. Důl byl otevřen úklonnou jámou, která protínala vápencovou formaci ležící pod uhelným ložiskem.

Průměrný sklon jámy byl 200 stupňů, s přibývajícím hloubkou se zvyšoval. Celkem se zde těžily čtyři ložiska, z kterých se materiál vyvážel štolami křížující svážnou jámu. Souběžně s ložiskem vedla další chodba, která spojovala ložisko Ryutan s první svážnou chodbou a Mezi těmito oblastmi se nacházel velký geologický zlom.

Uhlí bylo těženo metodou stěnování podél ložiska se zakládáním již vytěžených oblastí. Vytěžené uhlí bylo dopravováno pásovými dopravníky na hlavní chodby, odtud pak bylo dopraveno nekonečným lanem na spodek svážné chodby a pak dále pásovým dopravníkem napovrch.

Ventilaci dolu zajišťovaly čtyři povrchové ventilátory podpořené dalšími menšími přímo v dole. Protože se v dole nevyskytovaly ve větší míře důlní plyny, nepoužívalo se ani poprašování kamenným prachem.

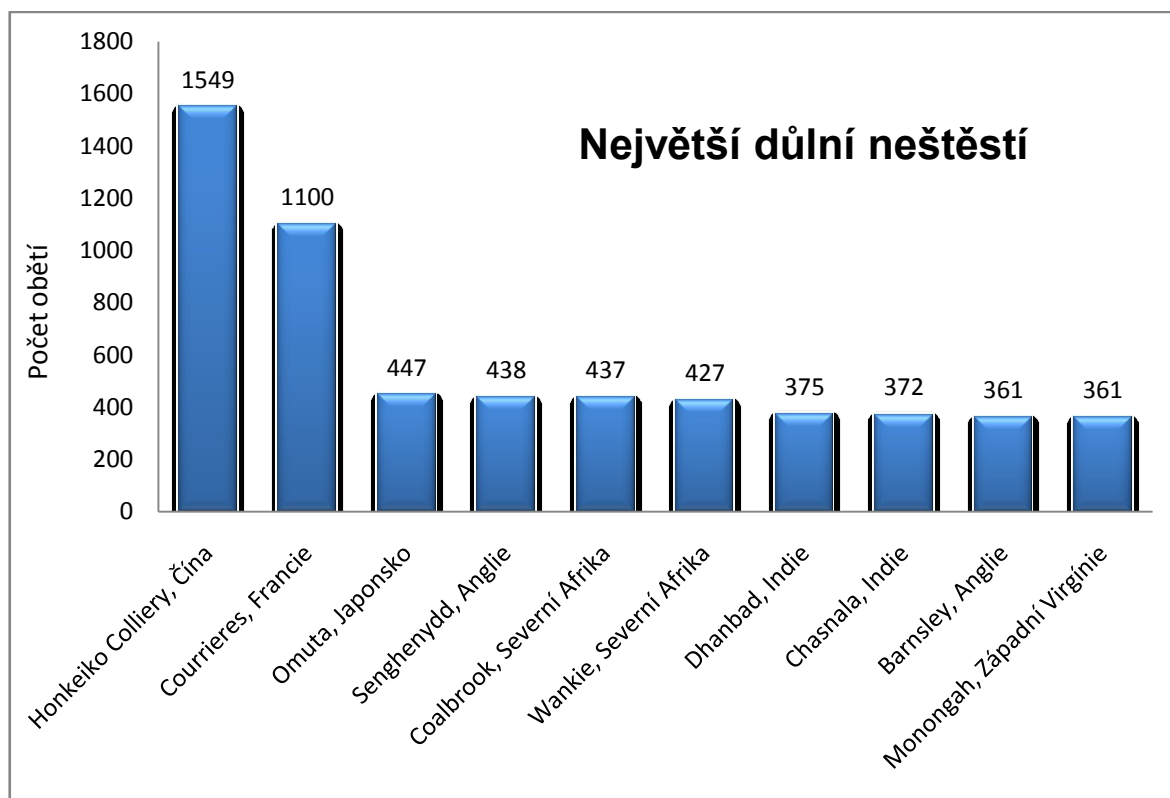
V době, kdy se stala v dole katastrofa, nebyly v podzemí prováděné žádné inspekce, protože se tvrdilo, že důl neplynuje a uhelný prach není výbušný, protože obsahuje jen 18 prchavých látek a 70 procent pevného uhlíku. Ale výpovědi horníků po explozi ukázaly, že se zde už několik menších výbuchů v minulosti již přihodilo. Vedoucí dolu a jeho podřízení prokázali v době katastrofy naprostou neznalost těchto faktů. Bylo to způsobené tím, jak se každé čtyři roky měnilo vedoucí osazenstvo dolu a navzájem si nepředávali klíčové informace, aby nemohli mít lepší výsledky než jejich předchůdci.

Ráno 26. dubna 1942 se prohnal provincií tajfun, který způsobil opakované výpadky proudu do dolu kvůli špatně nainstalovaným vedením vysokého napětí. Ředitel dolu proto nařídil vypnout dodávky z vysokého vedení a začít s opravou. Vypnutím proudu se zastavily čtyři velké ventilátory na povrchu a v dole o tom nikdo nevěděl. Když byly po hodině skončeny opravy vedení a zapnuly proud do dolu, ozvala se z úpadnice Ryutan obrovská exploze. Budova, která stále před vchodem byla rozmetána tlakovou vlnou. Vedoucí zaměstnanci dolu se rychle shromáždili před vchodem a když viděli, jak se ven valí kouř, nařídili, aby se zastavily větráky, protože by mohly proudy vzduchu v podzemí napomoci šíření ohně. Na dole bylo k dispozici 20 dýchacích přístrojů, ale jen deset mužů mělo minimální předepsanou praxi s přístrojem. Zformovali 2 záchranné skupiny po pěti mužích. Jedna skupina se vydala dovnitř úpadnicí Ryutan a druhá první úpadnicí.

Ale obě skupiny se téměř ihned vrátili, protože jim několik přístrojů selhalo. Krátce po explozi se podařilo jednomu horníkovi dostat se z dolu oblastí první úpadnice, ale velitel záchranných operací se ho ani nezeptal, co se dole stalo a jak to tam vypadá. Bylo zřejmé, že v této části mohlo být naživu ještě několik set lidí, protože když přežil jeden člověk, mohly zde být podmínky pro přežití dalších. Po několika hodinové prodlevě byly spuštěny ventilátory a začaly záchranné operace. Vynášení mrtvých těl trvalo deset dní, dalších dvacet dní trvalo, než byla obnovena těžba. Ohledáním těl bylo zjištěno, že většina obětí se otrávil oxidem uhelnatým, jen malé množství jich zemřelo na následky otřesů půdy nebo upálení. Většina obětí se našla na hlavních chodbách směřujících ke svážným chodbám na povrch, a kdyby byly ventilátory v provozu, obětí následků katastrofy by bylo podstatně méně.

Další průzkumy dolu odhalily místo, kde zřejmě vznikl výbuch. Bylo to místo v porubu na ložisku číslo 2, které bylo poblíž první svážné. Uprostřed vydobyté komory byl strop nejvyšší a po dobu, co neběžely ventilátory, se zde nashromáždil metan. Jak bylo v japonských dolech zvykem, elektrické motory pohánějící dopravníky byly v chodbě uloženy poměrně vysoko a ovládané magnetickými přepínači. Po explozi bylo zjištěno, že přepínač byl odstraněn a visící kabely byly zkratované. Zřejmě asi před výbuchem dělníci zjistili, že přepínač nejde a začali ho opravovat. Když byl vypnutý proud, tak se vodiče dotýkaly navzájem. Po zapnutí proudu se zkratovaly a jiskra zapálila nahromaděný metan. Plameny výbuchu měli sice jen 15 metrů, ale dostaly se do výstupkové chodby a dále se šířily těžním překopem, kde zapálily uhelný prach. Překop byl celý vyzděn kamením do obloukové klenby a pokryt betonem. Evidentně zde bylo stále dost jemného prachu na podlaze a žebrech klenby, a tak se postupně požár a výbuchy šířily dál až k úpadnici Ryutan. Celkově si výbuch vyžádal, jak už bylo výše zmíněno, 1527 obětí. Zraněno bylo 268 lidí, 22 jich zemřelo na následky zranění.

[7]



Graf č.1 Největší důlní neštěstí (počet obětí)

3.3 Ropná havárie

Petroleum je anglické slovo pro ropu a to pochází ze dvou latinských slov: petra a oleum. Slovo petra můžeme přeložit jako „ skála“ a slovo oleum znamená olej. Ropa se nachází v horninách, ale také někdy prosakuje na povrch země a vytváří jezírka. Ložiska ropy jsou v celé zemské kůře pod pevninou a pod mořem. Vytvořila se ze zbytků malých rostlin a zvířat, které se usadily na dnech moří a jezer před miliony let. Tyto zbytky se částečně změnily působením bakterií, a pak je překryly silné vrstvy usazenin. Působením tlaku a vysoké teploty se organické látky přeměnily na ropu a plyn (většinou metan). Další zvětšování tlaku vytlačilo ropu a plyn propustnými horninami na povrch. Většina ropy a plynu zůstala nakonec zachycena pod vrstvami nepropustných hornin.

Přes všechny havárie způsobené člověkem je sama příroda ropným znečišťovatelem životního prostředí. Přírodní úniky ropy v oceánském dně jsou nespočetněkrát horší než havárie tankerů a vrtných plošin. U pobřeží Santa Barbary denně uniká ropa do moře a to 20 až 25 tisíc tun a to již několik set tisíc let. Podle různých studií vědci došli k závěru, že každý rok unikne do moří a

oceánů okolo 47 miliónu galonů ropy. S počtem největších ropných havárií způsobené člověkem, kde uniklo 45 miliónu galonů, je únik srovnatelný.

3.3.1 Válka v Iráku (Kuwait)

Válka o ropu s Irákem měla devastující dopad na životní prostředí i na lidské životy. Irák kvůli ropě vtrhnul do Kuwaitu a Spojené Státy Americké se právě kvůli ropě do války zapojily.

Dopad války v Perském zálivu na obyvatelstvo byl obrovský. Tato válka si vyžádala přes 110 000 lidských životů. Kromě nedozírného lidského utrpení se jednalo o první válku, v níž byla masová destrukce přírody a životního prostředí použita jako zbraň pro boj. Přibližně šest až osm milionů barelů ropy bylo záměrně vylito do Perského zálivu, což způsobilo dosud největší ropnou havárii v dějinách. Ropná skvrna dlouhá čtyřicet osm kilometrů a dlouhá třináct kilometrů vážně znečistila více než pět set kilometrů pobřeží. Oheň zničil šest set kuvajtských vrtných věží a při požárech shořelo podle odhadů celkem šedesát sedm milionů tun ropy. Emise z požárů a odpad vytvořily hustý povlak sazí, plynů a agresivních chemických látek, které zasáhly pevninu a mořský ekosystém. Tato katastrofa způsobila obyvatelstvu vážné dýchací problémy a vytvořila dlouhodobé vážné riziko novorozeneckých defektů a rakoviny u postižených lidí.

Zátoky a pobřežní bahnité mělčiny byly zaneseny ropou, která v těchto oblastech, jež jsou životně důležité pro růst mořských organismů a jako loviště pro ptáky i jiné mořské živočichy, zcela zahubila místní flóru a faunu. Bylo zničeno přes patnáct tisíc čtverečních metrů mezopotamských mokřin. Příímým důsledkem války zemřelo kolem deseti tisíc ptáků. Bylo také zničeno loviště pro více než sto tisíc brodivých a stěhových ptáků.

Země utrpěla vojenským útokem fyzicky i biologicky. Zápalné bomby zničily povrchovou vrstvu země a vegetaci. Pásová vozidla uválcovala pouštní půdu a zabránila tak obnově růstu vegetace.

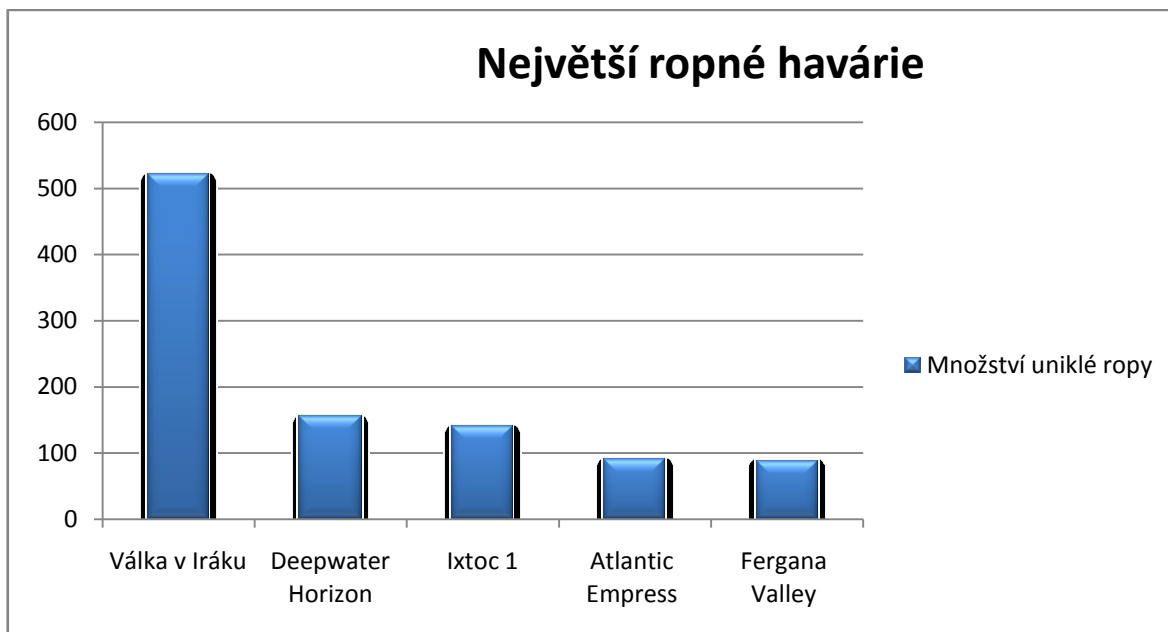
3.3.2 Havárie ropné plošiny Deepwater Horizon společnosti BP v Mexickém zálivu

Mezi druhou největší havárií v dějinách lidstva se stal výbuch na ropné plošině Deepwater Horizon v Mexickém zálivu. V dubnu 2010 plošina pracovala na vrtu v hloubce asi tisíc šest set padesát metrů jihovýchodně od pobřeží Louisiany.

20. dubna došlo k zatím nezjištěným příčin k velké explozi. Pracovníci byli ihned evakuováni, ale bohužel jedenáct jich zůstalo nezvěstných. Nejpravděpodobněji zahynuli při explozi. Po explozi následoval požár, který se nepodařilo uhasit. Až 22. dubna se celá plošina potopila. Bezpečnostní uzávěr, který měl v takovém případě vrt ihned uzavřít však selhal a ropa z vrtu začala vytékat přímo do moře. Následně se vytvořila ropná skvrna, která 25. dubna pokrývala již 1500km² a 30. dubna pokrývala 10 000 km².

Dne 27. května 2010 zveřejnila americká vláda zprávu, podle které z poškozeného vrtu uniká několikanásobně více ropy, než tvrdila společnost BP. Celkem tak podle expertů uniklo do Mexického zálivu sedmdesát až sto čtyřicet milionů litrů ropy. Což je několikrát více, než při předchozím největším podobném neštěstí.

Záchranné práce začaly sice vzápětí po nehodě, ale i za ideálních podmínek, které v lokalitě nepanují, lze odstranit pouze 15–20 % uniklé ropy. Navíc charakter pobřeží, kam ropa zamířila – mělké členité mokřady – jsou podle klasifikace Americké agentury pro ochranu životního prostředí nejzranitelnějším typem břehů vůči ropným skvrnám. To vše se odehrávalo v tom nejméně příznivém ročním období – v době páření ptactva a tření ryb, krevet a ústřic. Společnost BP použila na zastavení unikání ropy nespočet způsobů. Jednou z nich bylo i ucpání vrtu bahnem, což se ukázalo jako neúčinné. V plánu byl i výbuch malé atomové bomby, který byl následně zamítnut. Únik ropy se podařilo zastavit 15. 7. 2010 nasazením 40 tunového zařízení na ústí vrtu a uzavřením jeho ventilů. Definitivní řešení v podobě zabetonování havarovaného vrtu bude následovat. [8]



Graf 2 : Srovnání množství uniklé ropy do přírodního ekosystému (v milíonech galonů)

3.4 Zhodnocení negativních environmentálních vlivů nejaderných elektráren

Od samého počátku byla výroba elektrické energie závislá na spalování uhlí a později i ropy a zemního plynu.

Problémem tepelných elektráren je především jejich technický stav. Elektrárny vybavené filtry a ostatními bezpečnostními prvky jsou pro obyvatelstvo a ekologii menší hrozbou.

Spalování fosilních paliv, dřeva i biomasy produkuje hlavní znečišťující látky, jako jsou oxid uhelnatý CO, oxid siřičitý SO₂, oxidy dusíku NO₂, tuhé znečišťující látky – tuhé částice ve spalínách a organické látky. Podle současné legislativy tyto látky patří mezi základní znečišťující látky v ochraně ovzduší. Do ovzduší se dostávají v důsledku uvolnění tepla obsaženého v palivu spalovacím procesem. Vznikající emise vzbuzují obavy z globálního oteplování a skleníkového efektu.

Problém je také produkce velkého množství odpadů. To i přesto, že se dnes většina, asi 90 % vedlejších energetických produktů nepovažuje za odpad, protože se může dále využít. Například ve stavebnictví je vyhledávanou surovinou.

Dalším problémem jsou primární neobnovitelné zdroje, jejichž zásoby se neustále ztenčují. Vyčerpatelnost primárních zdrojů se nedá odhadnout, záleží na mnoha proměnných, jejichž hodnoty známe jen přibližně a mění se s časem.

A především těžba uhlí způsobuje řadu škodlivých účinků. Produkuje metan, což je silný skleníkový plyn. Metan tvoří asi 10,5% emisí skleníkových plynů vytvořených v důsledku lidské činnosti. Podle Mezivládního panelu pro změnu klimatu má metan větší vliv na globální oteplování než oxid uhličitý. Nejvíce škodlivé pro kvalitu ovzduší je spalování uhlí v elektrárnách a to kvůli emisím nebezpečných plynů. Tyto plyny mohou dále představovat hrozbu i pro horníky vzhledem k uvolnění tlaku a štěpení vrstev při hornické činnosti. Toto nahromadění tlaku vrstev může vést k explozím v průběhu nebo následně po těžbě.

Hlubinná těžba mění částečně ráz krajiny, dochází při ní k poklesům nebo propadnutí terénu. Část území se tímto dostane pod úroveň hladiny podzemních vod a tím změní výškové poměry lokality.

Povrchová těžba výrazně mění krajinu, eliminuje stávající zeleň, ničí půdní genetický profil. Ničí i volně žijící živočichy a jejich přírodní stanoviště. Povrchová těžba také nepříznivě ovlivňuje hydrologii regionu.

Zahluštění následků těžby je časově náročné a vysoce nákladné. Po rekultivacích a sanacích vznikají nové krajinné prvky, jezera, novotvary převýšených výsypek.[17]

Pro příklad uvádím již dokončenou sanaci a rekultivaci Velebudické výsypky, kam bylo založeno 237 mil m³ zemin převážně hlinito-písčitého charakteru. Rekultivací na ploše výsypky vznikla závodní dostihová dráha s travnatým povrchem, živými ploty překážek a travnatými tribunami pro diváky. [9]

Zdánlivě bez vlivu na životní prostředí se zdají vodní elektrárny. Výstavbou obrovských vodních nádrží se zásadně změní ráz krajiny a to má vliv na lokální ekosystém, migraci zvířat na břehu i ve vodě, hrozí nebezpečí protržení a následných záplav a tím dochází k vypařování metanu z vodní plochy. Metan velkou mírou přispívá k vytváření tzv. skleníkového efektu. A jsme opět u hrozby globálního oteplování.

Asi nejšetrnější k životnímu prostředí jsou větrné elektrárny, u kterých je odhad emisí oxidu uhličitého nejnižší ze všech dosud známých způsobů získávání elektrické energie. Výhodou větrných elektráren je absence paliva a čistota

provozu. Ale nevýhodou je působení na okolní krajinu, ohrožení ptactva nebo vodních savců. Nízkofrekvenční zvuk ruší jejich komunikaci. Negativně také pociťujeme estetický dopad větrných farem na tvář krajiny.

Za ekologicky šetrné můžeme označit všechny druhy solárních elektráren, u kterých je produkce emisí oxidu uhličitého jen o něco vyšší než elektráren větrných. Veškeré emise jsou navíc spojeny s výrobou, instalací a likvidací zařízení, samotný provoz je u fotovoltaických článků naprosto čistý. Náklady na samotnou technologii jsou vysoké a další vysoké náklady jsou spojené s velkým záborem půdy, který je nutný pro výstavbu takovéto elektrárny. Taky se klade velký nárok na rozsáhlou plochu a polohu výstavby, což ve stále se přelidňujícím světě bude v budoucnu problémem.

3.5 Zhodnocení dopadu jaderných elektráren na životní prostředí

Negativní dopad provozu jaderné elektrárny na okolí a kvalitu ovzduší je nulový ve srovnání s provozem ostatních nejaderných elektráren. A to proto, že nejvýznamnější součástí jaderných elektráren jsou chladicí věže, kde se voda ochlazuje odparem a do ovzduší uniká pouze čistá vodní pára.

Ale v případě havárie jaderné elektrárny jsou následky katastrofální a nedožrnné. Například u již zmiňované havárie v Černobylu zemřelo více než třicet lidí, z nichž většina zemřela na následky z ozáření, ostatní bych vyhodila. Více než 200 lidí, jak je oficiálně uvedeno, je postiženo akutními nemocemi z různého stupně ozáření. Samozřejmě, že ten problém se týká všech obyvatel, kteří se v době havárie nacházeli v kritické vzdálenosti od místa havárie. Na území zasažené explozí se trojnásobně zvýšila úmrtnost. Po zamoření trpí mnoho dětí nemocí štítné žlázy, zvýšil se počet onemocnění anémií a vzrostl výskyt leukemie. Na Ukrajině bylo touto havárií postiženo 1,5 miliónu lidí včetně 250 000 dětí, v Bělorusku žije 1,2 miliónu lidí na zamořeném území a asi 3,5 miliónu lidí v oblastech se zamořenou půdou.

„Nejdůležitějšími radioaktivními látkami ze zdravotního hlediska byly cesium a jód. Jód s poločasem rozpadu osm dní mohl být nebezpečný pouze v prvních týdnech po havárii. Cesium s poločasem rozpadu třicet let se zapojilo do potravinového

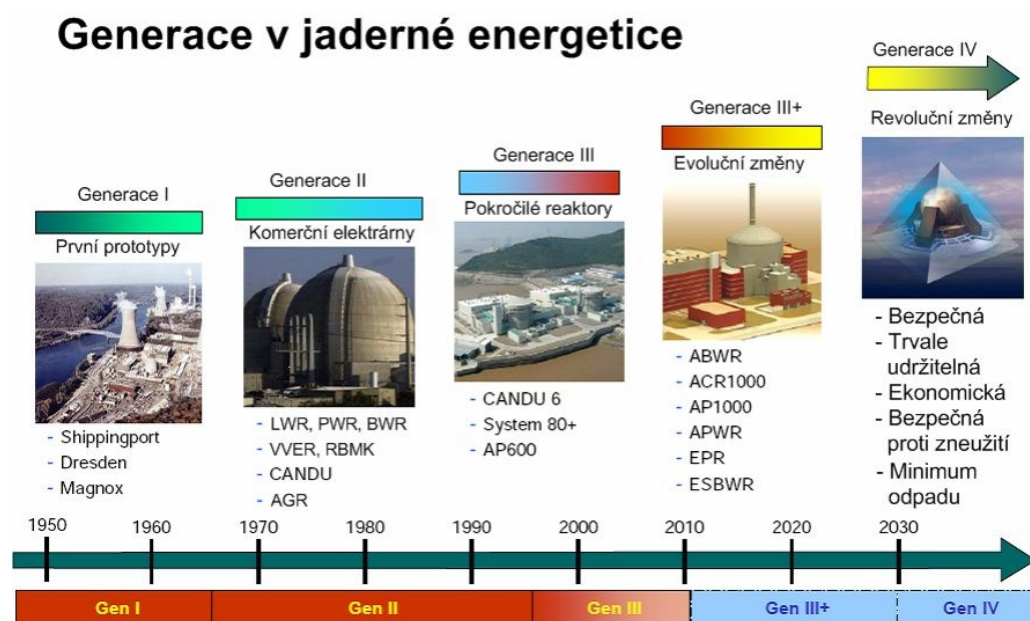
řetězce (například houby, divočina) a bude v něm působit desítky let.“ Citace <http://www.geology.cz/aplikace/geohazardy/katalog/geohazard-46/>

Negativní environmentální vliv, srovnatelný s tepelnými elektrárnami na fosilní paliva, má také samotná těžba uranu. Uran je surovina používaná v jaderné energetice. Dobývání uranové rudy se provádí převážně hlubinným způsobem. Při těžbě může případně dojít k úniku radionuklidů a dalších nebezpečných polutantů. Likvidace uranových dolů, úpraven, odkališť a zahlazení všech následků těžby uranu je technicky poměrně složitý, časově a finančně náročný proces.

4. Nové reaktory IV. Generace

4.1 Generace v jaderné energetice

Jaderné reaktory dělíme do několika generací dle druhu reaktoru a data postavení.



Obr. 1 generace v jaderné energetice z materiálu organizace „Gen IV international Forum“.

Mezi Reaktory I. Generace patří např. Shippingport v Pensylvanii, který začal fungovat 2. prosince 1957 přesně 15 let poté, co Enrico Fermi demonstroval první udržovanou jadernou reakci. O tři roky později závod Shippingport začal dodávat elektřinu do Pittsburghské oblasti. Nukleární pohonné jednotky v Shippingportu měly vyslouženo v roce

1982. Jednalo se o první kompletní dekontaminace a vyřazování z provozu reaktoru ve Spojených státech.

Reaktory druhé generace vychází z koncepcí ověřených u reaktorů I. Generace.

Jsou to téměř všechny současné komerční reaktory. Například reaktory PWR a WER jsou tepelné a tlakové, moderované i chlazené obyčejnou vodou. Jsou to nejrozšířenější typy reaktorů a pro svou vysokou bezpečnost se používají i k pohonu ponorek.

Palivový proutek tvoří malé válečky, které jsou naskládány a hermeticky uzavřené v obalové trubce ze zirkoniové slitiny. Asi tři stovky palivových proutků vytvářejí palivové články. Z nich je uvnitř tlakové nádoby reaktoru vytvořena aktivní zóna. Aktivní zónou kolem palivových proutků proudí voda pod vysokým tlakem, ta se ohřívá, dále je vedena potrubím do parogenerátorů, kde do varu uvede vodu v sekundárním bloku. Vzniklá pára pohání turbínu spojenou s generátorem elektrického proudu. Sekundární okruh je poté ochlazován v chladících věžích.

Reaktory PWR (Pressurized Water Reactor) v současnosti pracují v USA, v Brazílii a Argentíně, v Japonsku, Číně a Taiwanu, také v Jihoafrické republice, Antarktidě i v Jižní a Severní Korei. V Evropě je můžeme najít ve Španělsku, Švýcarsku, Francii, Belgii, Holandsku, Švédsku i Velké Británii. Sovětské typy VVER (vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor) se využívají v zemích bývalého komunistického bloku, tj. V Rusku, Bulharsku, Ukrajině a samozřejmě u nás v České Republice – JE Temelín a JE Dukovany. [10]

Jaderná elektrárna Temelín

Temelín se nachází v Jihočeském kraji asi 5 km jižně od města Týn nad Vltavou a 24 km severně od Českých Budějovic u obce Temelín v místech, kde stávala vesnice Temelínec. V roce 1979 vznikl investiční záměr na výstavbu jaderné elektrárny u Týna nad Vltavou a o rok později byla jaderná elektrárna schválena k výstavbě. Trvalo 20 let, než do jaderné elektrárny Temelín bylo zavezeno jaderné palivo v roce 2000. 11. června 2002 byl zahájen zkušební provoz prvního bloku. 18 dubna 2003 druhý blok

Už volba vhodného místa pro jadernou elektrárnu musela vyhovovat mnoha legislativním i odborným kritériím. Lokalita byla vybírána z různých hledisek (geografie, geologie, seismiky, existence zdrojů vody apod.) Ve prospěch výstavby hovořila i nepřítomnost krasových jevů, vulkanické činnosti, tektonických zlomů a aktivit. Svou roli také hrála pevnost a únosnost základových půd

Princip výroby elektřiny v Jaderné elektrárně Temelín, stejně jako v jiných jaderných elektrárnách, je obdobou výroby elektřiny v tepelných elektrárnách spalujících uhlí. Rozdíl je pouze v tom, že k získávání tepla se používá řízená jaderná reakce. V aktivní zóně reaktoru vzniká při štěpení jader uranu ^{235}U teplo. Tepelná energie je odváděna chladivem, v tomto případě upravenou (demineralizovanou) vodou pod velmi vysokým tlakem, který nedovolí vodě vřít. Z reaktoru proudí ohřátá voda do čtyř tepelných výměníků – parogenerátorů – kde svou tepelnou energii předává vodě cirkulující v odděleném sekundárním okruhu. Tlak vody v tomto okruhu je nižší než v okruhu primárním, voda v parogenerátoru se vaří a přeměňuje se na sytou páru. Pára z parogenerátoru proudí do turbíny, kterou roztáčí mechanickým působením na její lopatky. V generátoru dochází pak k přeměně pohybové energie na energii elektrickou. Pára, která odevzdala svou energii, je z turbíny odváděna do kondenzátorů, v nichž je páře odnímáno kondenzační teplo, zajišťuje chladicí okruh elektrárny. Jeho nejviditelnější část tvoří chladicí věže. Voda z kondenzátorů je vedena zpět do parogenerátorů, kde se znovu změní v páru a proudí do turbíny. Tím se cyklus vody a páry v sekundárním okruhu uzavírá. Produkci tepla reaktoru je možné řídit řídicími tyčemi a změnou koncentrace boru v chladivu.

Elektrárna Temelín je vybavena tlakovodními reaktory o tepelném výkonu 3000 MW. K tomu, aby měl reaktor tepelný výkon 1 W, musí v aktivní zóně proběhnout každou sekundu asi 30 miliard štěpení uranu ^{235}U .

Nejdůležitější částí reaktoru je aktivní zóna, kde při štěpné reakci vzniká velké množství tepelné energie. Stejně jako ostatní vnitřní části reaktoru je aktivní zóna uložena ve válcové tlakové nádobě. O masivnosti tlakové nádoby svědčí její parametry: je cca 11 m vysoká, má vnější průměr asi 4,5 m a tloušťka stěny její válcové části je 193 mm. Je navržena na tlak 17,6 MPa při teplotě 350 °C a je

vyrobena z vysoce kvalitní nízkolegované oceli. K její výrobě použila Škoda JS Plzeň speciální technologii, která zaručuje radiační odolnost materiálu. Ostatní vnitřní části reaktoru vytvářejí nosnou část aktivní zóny, usměrňují proudění chladicí vody aktivní zónou, slouží pro vyvedení vnitroreaktorového měření, regulaci výkonu reaktoru a mají ještě mnoho dalších funkcí.

Bezpečnost jaderné elektrárny se opírá především o promyšlenou konstrukci jaderného zařízení. Projektanti, kteří navrhovali řešení bezpečnosti v elektrárně, museli vycházet ze všech představitelných provozních událostí. Elektrárna musí odolávat jak všem přírodním jevům, tak i všemu, co může vědomě či nevědomě vyvolat člověk. Možná přírodní rizika jsou blesky, vichřice, extrémní teploty, záplavy a zemětřesení. K jevům, vyvolaných člověkem, můžeme mimo jiné počítat například pád letadla na objekt elektrárny a teroristický útok. Princip několikanásobné bariéry zajišťuje bezpečnost jaderné elektrárny proti úniku radioaktivních látek. Bezpečnostní systém 3x100 % zajišťuje ochranu proti havárii systému. Systém napravuje následky vzniklých poruch a znemožňuje další rozšíření poruchy.

Při výrobě elektřiny vzniká odpad. V jaderné elektrárně vzniká především nízkooaktivní a středně aktivní a použité jaderné palivo. Použité palivo je vyjmuto z reaktoru, chlazeno a stíněno v bazénu. Ten umožňuje skladovat palivo po dobu deseti let. Teprve poté se překládá na dobu 40-60 let do tzv. suchých skladů použitého paliva. Temelín tento sklad neměl až do minulého roku. Do té doby se muselo jaderné palivo uskladňovat v jaderné elektrárně Dukovany. Použité palivo musí být pod stálým dozorem a kontrolou. Použité jaderné palivo lze po přepracování energeticky využít opakovaně. Například palivo vyjmuté z lehkovodních reaktorů pracujících v Dukovanech a Temelíně obsahuje stále 95% nespotřebovaného uranu, z toho 1% štěpitelného ^{235}U a 1% štěpitelného izotopu plutonia ^{239}Pu . K výhodám přepracovaného použitého jaderného paliva patří redukce původního množství paliva na méně než dvacetinu původního objemu a možnost získání různých radioizotopů pro lékařské a průmyslové potřeby. [11]

Do druhé generace reaktorů patří i varný reaktor BWR, vodografitový reaktor LWR, těžkovodní reaktor CANDU a reaktor RBMK v Černobyli.

Reaktor RBMK (Reaktor bolšoj moščnosti kanalnej, vysokovýkonný kanálový reaktor) je varný reaktor, používající grafit jako moderátor a lehkou vodu jako chladivo. Chladicí voda je čerpána do reaktoru zespodu, prochází reaktorem v kanálech obalujících palivové tyče a mění se ve směs vody a páry, s obsahem asi 15% páry. Voda a pára se oddělují v bubnech separátorů páry, umístěných na dvou stranách nad reaktorem. Trubky od jednotlivých kanálů jsou vedeny do separátorů z boku. Ode dna separátorů se odvádí voda zpět do pump chladicího okruhu, kde se mísí s chladnější vodou z deaerátoru. Z vrchní části separátorů se odvádí pára do turbín, z nich do kondenzátoru kde se zbytek páry sráží na vodu, pak do deaerátoru, kde se odstraňují rozpuštěné plyny. Deaerátor také slouží jako zásobník pro chladicí vodu. Chladicí systém je rozdělený na dvě části, každá s čtveřicí hlavních cirkulačních pump a vlastním bubnem separátoru.

Reaktor je řízen regulačními tyčemi. Většina tyčí je do reaktoru vsunována shora. Regulační tyče jsou chlazené vodou, jejich kanály jsou tedy naplněné vodou. Jelikož voda je sice slabým ale přesto poměrně slušným absorbérem neutronů, grafitová část slouží k jejímu vytlačení a dalšímu snížení absorpce neutronů v regulačním kanálu. Při zasouvání regulační tyče toto může vést ke krátkodobému nárůstu výkonu ve spodní části reaktoru v jejím okolí. Spodní část reaktoru je umístěna ve vzduchotěsném "polokontejntmentu". Pod reaktorem se nalézají tunely pro distribuci páry, a pod nimi dvě úrovně s bazény naplněnými vodou, do kterých z distribučních tunelů vedou vertikální trubky. V případě havárie s únikem páry je tato vedena skrz trubky do bazénů, kterými probublává a přitom se chladí, kondenzuje a její tlak se snižuje. Zároveň se z ní odstraňují aerosolové částice. Kapacita trubek stačí pro odvedení páry z jednoho až dvou prasklých tlakových kanálů; větší poškození může vést k nárůstu tlaku dostatečnému na zdvižení vrchního biologického štítu a potrhání ostatních kanálů.

Z některých reaktorů druhé generace se vyvíjejí reaktory III. Generace jako například CANDU 6. Tyto reaktory mají mnohem lepší bezpečnostní vlastnosti a

dochází u nich k intenzivnějšímu využití paliva. Tím se prodlužuje doba mezi výměnami paliva a životnost elektrárny se posouvá asi na 60 let.

Tepelný, těžkou vodou moderovaný reaktor CANDU 6 (CANada Deuterium Uranium) byl vyvinut v Kanadě, ale používá se hlavně v Rumunsku.

Označení generace III+ se používá u projektovaných reaktorů, které mají vylepšené prvky pasivní bezpečnosti tak, že se případě nestandardní situace dostanou do bezpečného stavu automaticky bez jakýchkoliv aktivních částí. Tento reaktor pracuje již od roku 1996 v Japonsku. Ve Finsku a ve Francii se teprve staví reaktor EPR, který se bude řadit do této generace III+.

4.2 Technologické požadavky na vývoj reaktorů IV. Generace

Podle světové rady pro energii (WEC) se na Zemi zvýší spotřeba elektrické energie během následujících 25 let na dvojnásobek a růst požadavků na veškeré energie je předpokládán o 1,7 % ročně. [19]

U nově projektovaných a vyvíjených reaktorů jsou kromě bezpečnostních požadavků kladeny i další požadavky na snížení odpadu a zajištění dodávek malých elektráren do rozvojových zemí.

- Vyvinout zvýšené záruky pro jadernou bezpečnost, včetně účinného a efektního monitorování radioaktivního materiálu a jaderného paliva
- Vyvinout pokročilé spalovací reaktory za pomoci recyklačních systémů, u nichž by docházelo k likvidaci dlouhodobých transuranů při současné výrobě energie.
- Minimalizovat množství odpadu
- U vybraných velmi vysokoteplotních typů je požadována schopnost výroby vodíku i možnost využití k desalifikaci mořské vody (Asi miliarda obyvatel Země nemá přístup k pitné vodě). Tato generace reaktorů by měla pomoci zajistit udržitelnost rozvoje na Zemi pro několik dalších generací.

Reaktory IV generace by měla umožnit ještě intenzivnější využití jaderné energetiky a zajistit ekologickým způsobem dostatek energie. Reaktory, které budou navrženy v příštích dvaceti letech a s jejichž uvedením do provozu se

počítá na přelomu dvacátých a třicátých let tohoto století. Spolehlivost těchto jaderných systémů GIV bude založena zejména na vysoké inherentní a pasivní bezpečnosti. Tento přístup s uvažovanou pravděpodobností havárie spojenou s únikem radioaktivních prvků do okolí elektrárny 10^{-8} až 10^{-9} za rok provozu, umožňuje jako novum absenci potřeby vnějšího havarijního plánu, tj. opatření na ochranu obyvatelstva žijícího v okolí takové elektrárny

U jaderných elektráren s reaktory IV. generace je kladen důraz na zvyšování bezpečnosti a spolehlivosti (Safety and Reliability), snaha výrazně redukovat počet a stupeň úniku radioaktivních materiálů a eliminovat možnosti významného poškození elektrárny a jejích následků.

Dalším důležitým kritériem je ekonomika provozu jaderných elektráren a jejich konkurenceschopnost s ostatními zdroji energie. Životnost a ekonomická výhodnost je velmi důležitým kritériem.

Důrazný požadavek na zamezení šíření jaderných zbraní (Proliferation Resistance and Physical Protection), nebo zneužití jaderných technologií k teroristickým činům. Nuclear Nonproliferation Treaty je klauzule, která monitoruje veškerou světovou zásobu jaderného materiálu.

Kladen je i důraz na pasivní bezpečnostní prvky založené na jednoduchých fyzikálních principech. Dostatečně pevná konstrukce budovy a kontajmentu, která zajistí ochranu i před pádem letadla nebo útokem zbraňovým systémem například raketou. [12]

4.3 Reaktory s velmi vysokou teplotou

Jaké nároky na energii budou za několik desítek let. Podle různých studií budou industrializované země a celý svět potřebovat nutně další a další elektrickou energii. Bude se muset rapidně zmodernizovat elektrická infrastruktura, tak aby splnila rostoucí nároky po elektrické energii. Jeden z těchto konceptů je i VHTR (Very-High Temperature reactor), který je unikátní tím, že má schopnost výroby vodíku bez spotřeby fosilních paliv a emitování skleníkových plynů. Mezinárodní spolupráce s partnery sdruženými ve fóru GIV, provádí ministerstvo energetiky USA výzkum a vývoj příští generace jaderných reaktorů nazvaných NGNP (Next Generation Nuclear Plant).

VHTR reaktory by měli být dalším krokem ve vývoji vysokoteplotních plynem chlazených reaktorů. Systém těchto reaktorů bude vynikat vysokou bezpečností z hlediska těžkých havárií spojených s tavením aktivní zóny, ale výstupní parametry jejich je přímo předurčují pro zplyňování uhlí a produkci vodíku.

Využitím vysoké teploty chladiwa přes 1000°C lze produkovat termochemickým jód-sirným I-S procesem vodík přímo z vody, případně z tepla s mimořádnou účinností. Předpokládejme, že jednotka o výkonu 600 MWt určená k produkci vodíku by vyrobila až 2 milióny krychlových metrů vodíku za den. Systém může zaujmout místo v rafinerství a petrochemickém průmyslu, kde by mohl sloužit jako zdroj procesního tepla. Dalším využitím by mohlo být i v metalurgii.

Základní technologie byla odzkoušena v projektech vysokoteplotních reaktorů chlazených plynem (HTGR) například Peach Bottom, AVR atd.

V Německu v letech 1986 - 1990 byl úspěšně provozován prototyp vysokoteplotního reaktoru. Reaktor obsahoval 675 000 grafitových palivových koulí o průměru 6 cm, kde grafit sloužil jako moderátor. Každá koule obsahovala 10 000 mikrokuliček paliva celkem 10 gramů thoria a 1 gram silně obohaceného uranu – povlečených vždy třemi pevnými vrstvami karbidu křemíku a uhlíku. Výměna palivových koulí s vyhořelým uranem za čerstvé probíhala sypáním do reaktoru za plného provozu. Oproti tlakovodním reaktorům podstatná výhoda, jelikož nedochází k odstávce reaktoru. Chladicí helium dosahovalo teploty na výstupu 750°C a demonstrační elektrárna poskytovala do veřejné sítě elektrický výkon 300 MWe.

Požadavky na palivo má vliv i rostoucí teploty. V reaktoru HTGR bylo použito palivo pokryté karbidy křemíku pro teploty kolem 1200°C. Při vyšších teplotách musí být materiály pokryté na bázi karbidu zirkonia. U HTGR reaktorů se prokázala výhoda ZrC pokrytí, které dovoluje vyšší výkonovou hustotu i energii a odolnost proti chemickému útoku štěpným produktem palladia.

Pro ostatní prvky systému, jako tlakovou nádobu, tepelný výměník, pokrytí kontrolních tyčí a dalších součástí je třeba se zaměřit na nové vysoce legované slitiny. Pro tlakovou nádobu pak na vláknem vyztužené keramiky, slinuté alfa-křemíkové karbidy, keramiky se směsí oxidů a ostatních vysokoteplotních a

vysoko-pevnostních materiálů. Pro výměník tepla, plynovod a izolační ventily, které jsou v kontaktu s horkým heliem lze použít současné kovové materiály. Vnitřek reaktoru, který bude obsahovat buď prismatické palivové bloky nebo palivové koule, bude vyroben z vysoce kvalitního grafitu.

Systém VHTR má největší výhody v ekonomičnosti. Vysoce efektivní produkci čistého vodíku a dále v bezpečnosti a spolehlivosti. Díky základním bezpečnostním rysům reaktoru a samotného paliva. Kladně je hodnocen ve fyzické ochraně a nešíření jaderného materiálu, ale pouze "neutrálně" v udržitelnosti, vzhledem k jeho otevřenému palivovému cyklu. Primárně se předpokládá využití VHTR reaktorů pro produkci vodíku a při dalších procesech, které potřebují vysoké teploty, stejně tak pro vytápění a centrální zásobování teplem. Může být ale využit i pro výrobu elektřiny. První elektrárna by měla být spuštěna kolem roku 2020 [13]

4.4. Reaktory využívající vodu v superkritické fázi

SCWR je nadějná pokročilá technologie k produkci elektrické energie, která staví na již používaných technologiích z uhelné energetiky a rozšiřuje parametry dnes nejvíce používaných typů jaderných reaktorů (PWR a BWR), které tvoří asi 80% současné reaktorové flotily. SCWR může být koncipován jednak jako rychlý jaderný reaktor s uzavřeným palivovým cyklem nebo jako tepelný reaktor s otevřeným palivovým cyklem – obě varianty jsou technologicky možné, byť je v současné době hlavně dáván důraz na tepelný typ.

Nejdůležitější vlastností SCWR je termická účinnost navazujícího tepelného oběhu pohybující se, díky jeho vysokým parametrům (teplota, tlak), okolo 45%, v porovnání s cca. 32% účinnosti současných lehkovodních reaktorů.

Hlavním principem transformace energie v energetických zdrojích je termodynamický tepelný oběh. Základními prvky každého tepelného oběhu jsou ohříváč (jaderný reaktor nebo kotel atp.), chladič (mokrý a suchý chladicí věže atd.) a samotný tepelný cyklus umístěný mezi ohříváčem a chladičem. V roce 1824 dokázal ve svém díle "Úvahy o hybné síle ohně" Nicolas Léonard Sadi Carnot, že žádný tepelný cyklus nemůže mít vyšší účinnost než -na počest po něm pojmenovaný- Carnotův cyklus. Účinnost Carnotova cyklu je funkcí pouze

absolutní teploty ohříváče a chladiče. Z termodynamického hlediska je tedy jedinou možností ke zvýšení termické účinnosti oběhu zvětšení teplotního rozdílu mezi ohříváčem a chladičem, kde je navíc teplota chladiče dána teplotou okolí. Proto je u moderních zdrojů tepla, tedy i jaderných reaktorů, snaha stále zvyšovat jejich parametry a tak dosahovat větších teplotních rozdílů mezi ohříváčem a chladičem.

Jedná se opět o klasický reaktor s moderovanými neutrony. V tomto případě se jako moderátor i chladicí médium používá voda v superkritické fázi. Jedná se v principu o lehkovodní reaktor chlazený a moderovaný vodou za vysokého tlaku a teploty. Hodnoty teploty a tlaku překračují současně hodnoty pro superkritický bod ve fázovém diagramu (pro vodu to je 374,15 °C a 22,12 MPa). Konkrétně se uvažuje o teplotě mezi 510 a 550 °C a tlaku 25 MPa. V takovém případě je tekutina ve stavu jedné fáze a má částečně vlastnosti kapaliny i plynu. Výhodou využití vysoké teploty chladicího media je vyšší efektivita konverze tepelné energie. V daném případě se využitím vody v superkritickém stavu zvýší účinnost elektrárny z 33% na 45%. Výhodou tohoto typu reaktorů je, že je založen na dvou známých a dobře odzkoušených technologiích. Lehkovodní reaktory (varné i tlakové) patří k nejpoužívanějším typům současných reaktorů a spolehlivě fungují už řadu desetiletí. Jako palivo by se používal osvědčený oxid uranu. Pasivní bezpečnostní prvky jsou podobné těm známým z konstrukce varných lehkovodních reaktorů. Využití vody v superkritické fázi je docela běžné u klasických spalovacích elektráren. Hlavním cílem tohoto reaktoru by měla být levná a efektivní výroba jaderné energie. Jsou úvahy navrhnout i variantu, ve které by se potlačila moderace neutronů a reaktor by pracoval jako rychlý. Ovšem v tomto případě se vývoj takové koncepce dostává do neznámých končin a bude mnohem náročnější. [14]

4.5 Reaktory založené na roztavených solích

Jaderné reaktory využívající roztavené fluoridové soli jsou velmi zajímavým navrhovaným typem reaktorů IV. generace. Mohly by přispět k velmi efektivnímu využití a transmutaci vyhořelého jaderného paliva z klasických reaktorů. Tím by se

dosáhlo velmi výrazného snížení množství a nebezpečnosti radioaktivního odpadu z jaderné energetiky.

Tento typ reaktoru, jehož anglické označení je MSR (Molten Salt Reactor), může v principu pracovat jak jako rychlý tak i klasický reaktor. Nebo i něco mezi tím s využitím tzv. epitermálních neutronů. Jako palivo i chladivo by sloužily zmíněné roztavené soli. Představuje ve skutečnosti řadu různých potenciálních řešení, které se liší v použitém palivu, chladivu i energetickém spektru používaných neutronů. V klasické variantě by bylo palivo rozpuštěno v solích ve formě fluoridu uraničitého (UF_4) nebo fluoridu thoričitého (ThF_4). Jako sůl by se používala směs LiF a BeF_2 , která je výhodná i z toho důvodu, že se v nich fluorid uraničitý i fluorid thoričitý výborně rozpouštějí. V případě spalování transuranů se budou využívat trifluoridy, například fluorid plutonitý (PuF_3). Ty se nejlépe rozpouštějí v solích obsahujících fluorid lithný a fluorid sodný.

V jakém režimu bude daný reaktor pracovat, závisí na jeho konkrétní konstrukci. Uvažují se varianty klasické s moderací (zpomalováním) neutronů až do tepelné oblasti i varianty s mírnou moderací do již zmiňované oblasti energie neutronů, která se označuje jako epitermální nebo rezonanční. Možné jsou i varianty bez moderace pracující v podobě rychlého reaktoru pro spalování plutonia a transuranů. Pokud se bude jednat o množivý reaktor zaměřený na využití thoria, využívají se opět moderované neutrony a jde o typ reaktoru, který má pro uskutečnění samostatného thoriového cyklu dostatečný koeficient množení.

Základní schéma reaktoru založeného na tekutých solích je složeno z primárního okruhu, kde cirkuluje sůl obsahující palivo. Jeho část, která tvoří aktivní zónu a je v ní vždy většina cirkulujícího media, obsahuje v případě reaktoru využívajícího tepelné neutrony grafit jako moderátor. Důležité jsou také kontrolní tyče, které absorbují neutrony a mohou se nořit dovnitř nebo vysunovat ven z aktivní zóny. Primární okruh obsahuje i přepracovací jednotku, která umožňuje odstraňovat produkty štěpení nebo v případě množivého reaktoru produkované palivo. Teplo z primárního okruhu se přes výměník předává do sekundárního okruhu, kde jsou už soli určené pouze pro chlazení (v daném případě přesněji řečeno pro přenos tepla od radioaktivního primárního okruhu k zařízení, které bude teplo využívat).

Když nám jde o výrobu elektrické energie, předá se přes tepelný výměník teplo ze sekundárního do terciálního okruhu, který obsahuje třeba vodu a vyrobená pára pak pohání turbínu. Je možné také teplo ze sekundárního okruhu využít jiným způsobem.

Problémem je, že, ačkoliv o možnostech reaktorů s roztavenými solemi se uvažuje již dlouho, existují, kromě experimentálních testů v padesátých a šedesátých letech minulého století, zatím pouze na papíře. Jedná se pravděpodobně o nejnáročnější typy reaktorů generace IV. I když tedy slibují řadu výhod, cesta k funkčnímu ekonomickému modelu bude ještě velmi náročná a dlouhá.

Výhody a problémy těchto reaktorů

Velmi důležitá je u nich možnost průběžné separace štěpných produktů, transuranů a v množivém režimu izotopů, které lze využít jako palivo v klasických reaktorech. V případě reaktoru, který pracuje v režimu thoriového cyklu jako množivý, lze podmínky nastavit tak, aby byl množivý koeficient dostatečný pro soběstačný provoz energetiky postavené pouze na thoriu. V tomto případě vzniká zachytem neutronu thorium 233, které se rychle přeměňuje na protaktinium 233. Poločas přeměny tohoto izotopu na uran 233, který se dá využít jako palivo, je okolo měsíce. Pokud jej necháme v aktivní zóně reaktoru, tak se může přeměnit na protaktinium 234, které se přeměňuje na uran 234. Ten se jako palivo využít nedá, takže je výhodné protaktinium 233 z reaktoru odebrat a vložit do něj až vzniklý uran 233. A to je možné právě jen při průběžné separaci v reaktorech s roztavenými solemi.

Reaktor založený na roztavených solích umožňuje i velmi intenzivní vyhoření transuranů z vyhořelého paliva klasických reaktorů. Je možné během přepracování odstraňovat hlavně ty štěpné produkty, které by absorbovaly neutrony a zhoršovaly podmínky v aktivní zóně reaktoru.

Z bezpečnostního hlediska je výhodou i jednoduchost aktivní zóny. Takový reaktor může splňovat podmínky pasivní bezpečnosti. Má záporný koeficient reaktivity, což znamená, že při růstu výkonu (teploty) klesá počet štěpení a systém se stává podkritickým.

To, že je koncepce reaktorů využívajících tekuté soli tak výrazně odlišná, přináší pochopitelně i problémy. Palivo není fixováno v pevné struktuře, ale cirkuluje rozpuštěné v tekutém stavu. V principu by sice reaktory založené na tekutých solích mohly být i bezpečnější než reaktory s palivem v pevné fázi, ovšem současné normy jsou vytvořeny na klasické typy reaktorů a i v této oblasti by bylo potřeba provést dost radikálních změn. Nevýhodou může být i průběžná separace, která může vést ke zneužití separovaných materiálů ke konstrukci jaderné bomby. I s tím je třeba počítat při jejich konstrukci a tuto možnost co nejvíce ztížit. [15]

4.6 Rychlé reaktory chlazené plynem

U těchto reaktorů by bylo možné využít zkušenosti získané s klasickými reaktory chlazenými plynem. Jako chladivo bychom používali hélium a pracovní teplota by byla asi 850°C, protože tato teplota by mohla umožnit efektivní produkci vodíku. Systém tohoto reaktoru je zatím ve vývoji. Tento reaktor má uzavřený palivový cyklus, takže spotřebovává i vysoce radioaktivní aktinidy. Jeho výhodou je, že při výrobě elektřiny bude roztáčet turbínu přímo plyn použitý k chlazení. Vysoká teplota reaktoru bude mít využití k výrobě vodíku termochemickou cestou. Proto tyto reaktory se vyznačují vyšší účinností a bezpečností a měli by produkovat menší množství radioaktivního odpadu. Teplota chladiva na výstupu z aktivní zóny by měla dosahovat až 1000°C, tlak chladiva se pohybuje do 10 MPa. GFR je reaktor IV generace a zatím je ve fázi vývoje a studií. Jako palivo by se mohlo používat uran, ale mohli by se spalovat i transurany z vyhořelého paliva. Palivo by mělo být v keramické podobě. Pro zajištění co nejefektivnějšího spalování by mělo být palivo v keramické podobě kuliček nebo hranolů. V areálu by se pak rovnou přepracovávalo vyhořelé palivo. Uran a transuran by se odděloval k dalšímu využití, aby co nejvíce snížil objem radioizotopů poslaných do konečného úložiště.

4.7 Rychlé reaktory chlazené sodíkem

Tento rychlý reaktor jako chladivo používá tekutý sodík. Jeho teplota by měla být menší než reaktor chlazený plynem a to pouze 550°C. Jedná se o reaktor s vysokoenergetickými neutrony a uzavřeným palivovým cyklem. Primární poslání systému je správa vysoce aktivních odpadů a zvláště pak aktinoidů a plutonia. Uzavřený aktinoidový palivový cyklus si můžeme představit ve dvou různých

uspořádáních. První, středně velký (150 - 500 MW_e), sodíkem chlazený reaktor s palivem z kovové slitiny uranu-plutonia-zirkonia, podporovaný palivovým cyklem založeným na pyrometalurgickém zpracování (pyroprocesu), umístěném společně s reaktorem. Druhou možností jsou střední až velké (500 - 1500 MW_e), sodíkem chlazené rychlé reaktory s dobře známou a ve světě používanou směsí MOX, podporovanou palivovým cyklem, založeným na pokročilém vodním zpracování v centrální oblasti, obsluhující několik reaktorů.

4.8 Rychlé reaktory chlazené olovem

Rektor je chlazen za pomoci olova nebo eutektickou směsí olova a bismutu. Výhodou je snížená teplota tavení. Nevýhodou tohoto reaktoru je, že reakcemi neutronů s bismutem a následným rozpadem beta se produkuje radioaktivní izotop ²¹⁰Po (poločas rozpadu v řádu stovky dnů), který je nebezpečným alfa zářičem. Běžná teplota by měla být stejná jako rektor chlazený sodíkem a to 550°C. Pokud by se při výrobě použil speciální materiál pro konstrukci chladicího okruhu, mohly by být teploty 800°C. Vyšší teploty by umožnily termochemickou produkci vodíku pro vodíkové hospodářství. Palivo by bylo v kovové formě. Tento typ reaktoru se již používá a to v ruských ponorkách.

U těchto reaktorů by bylo možné využít zkušenosti získané s klasickými reaktory chlazenými plynem. Jako chladivo bychom používali hélium a pracovní teplota by byla asi 850°C, protože tato teplota by mohla umožnit efektivní produkci vodíku.

[16]

5. Návrhy a doporučení

Typ elektrárny	Výhody	Nevýhody
Jaderné elektrárny	Nejefektivnější zdroj EE Vysoká účinnost Malá zátěž ŽP	Ukládání odpadu Možnost havárie Drahá technologie a výstavba zařízení
Tepelné elektrárny	Dobrá účinnost (u moderních)	Vysoké emise oxidu dusíku a síry Devastace krajiny při těžbě uhlí Velké množství odpadu Přímý dopad na zdraví obyvatelstva
Vodní elektrárny	Ekologicky čistý provoz Žádný odpad Vynikající účinnost	Nebezpečí v době záplav a povodní Technologicky náročné Poměrně drahá výstavba
Geotermální elektrárny	Čistý zdroj energie Žádný odpad	Náročný výběr lokace
Solární elektrárny	Obnovitelný zdroj energie	Nákladná výstavba Malá účinnost Náročný výběr lokace Odpad v podobě akumulátorů
Větrné elektrárny	Malé náklady na výstavbu Čistý zdroj energie	Hluk Malá výkonnost Drahá údržba Časově nestálý zdroj Esteticky nezapadá do krajiny

Tabulka č.1 (Výhody a nevýhody elektráren)

Z údajů v tabulce je zřejmé, že žádný typ elektrárny není z hlediska života a udržení stavu životního prostředí ideální.

Pojmenovat tuto kapitolu “Návrhy a doporučení” bylo ode mne poněkud předčasné.

Protože nevím, jaký bude vývoj v budoucnu. Jestli se technologie jaderných elektráren zlepší opravdu natolik, aby nedocházelo k jaderným haváriím a nebo pro elektrárny na fosilní paliva bude vyvinut lepší a dokonalejší filtr pro zachycení všech škodlivých emisí.

Navrhnout mohu akorát jen doporučení pro nás všechny, abychom se více zajímali o vše, co se týká nejen bezpečnosti a vůbec možnosti získávání elektrické energie, ale i o její rozumnou spotřebu, protože zdroje elektrické energie nejsou neomezené. S tím úzce souvisí role státu ve větší informovanosti veřejnosti jak o kladech tak záporech využití jaderné energie. Nebylo by dobré, aby u lidí převládaly pouze negativní názory na jadernou energetiku, protože lze konstatovat, že to, co člověk nezná, nebo čemu nerozumí, z toho má strach.

Doporučit můžu další využívání odpadu a budování nových a bezpečných reaktorů namísto udržování těch starých s nízkou bezpečností, i když to bude nošení dříví do lesa.

5.1. Vyhořelé palivo jako surovina

Vyhořelé palivo ze současných jaderných reaktorů je díky svému složení nebezpečný materiál. V palivu se během využití v reaktoru akumulují neutronové jedy - štěpné produkty absorbující neutrony a tím snižující účinnost štěpné reakce, palivo je tedy nutno obměňovat mnohem dříve, než dojde k jeho energetickému vyčerpání. Většina štěpitelných jader v něm zůstává netknuta, pouze se nedají využít.

Krátkodobé izotopy, s poločasem rozpadu hodin až dnů, jsou zodpovědné za zahřívání reaktoru po odstavené štěpné reakce a nutnost pokračovat v jeho chlazení. Moderní reaktory obsahují prvky pasivní bezpečnosti, zajišťující chlazení i při úplném výpadku energie pro pohon pump a ventilů. Havárie reaktorů ve Fukušimě byla primárně zapříčiněna jejich stářím, díky němuž tyto bezpečnostní prvky ještě neměly zahrnuty v konstrukci; při výpadku generátorů tedy po vybití záložních baterií nebylo možno ovládat ventily chladicího okruhu.

Střednědobé izotopy, s poločasem řádově několik let až desetiletí, jsou zodpovědné za vysokou zbytkovou aktivitu vyhořelého paliva v horizontu desítek až stovek let. Převážně se jedná o beta/gama zářiče. Spolu s krátkodobými izotopy jsou převážně zodpovědné i za produkci zbytkového tepla, díky němuž se čerstvé vyhořelé palivo musí po nějakou dobu dochlazovat, než je přemístěno z chladících bazénů do kontejnerů v suchém meziskladu. Po vymření krátkodobých izotopů je asi polovina tepla je produkována rozpadem cesia-137, a většina druhé poloviny je produkována rozpadem Sr-90.

Významným problémem pro skladování vyhořelého paliva jsou však dlouhodobé izotopy z rodiny aktinoidů, vzniklé zachytem neutronů v těžkých jádrech nebo jako zbylá štěpitelná jádra výchozího paliva. Některé mají poločas rozpadu řádově v tisících letech. Tyto jsou hlavní příčinou dlouhodobé nebezpečnosti vyhořelého paliva a nutnosti jej uložit po velmi dlouhou dobu v trvalých úložištích.

Aktinoidy, představující tento problém, však samy mohou energii produkovat. I jádra, neštěpitelná pomalými neutrony v konvenčních reaktorech, mohou být rozštěpena neutrony rychlými. Rychlé neutrony jsou navíc méně ovlivňovány absorpcí štěpnými produkty. Při použití neutronových toků o dostatečné intenzitě a energii je tedy možné dosáhnout podstatně vyššího stupně využití paliva, a zároveň podstatně nižšího podílu dlouhodobých aktinoidů v palivu vyhořelém. Vyhořelé palivo tedy představuje nejen nebezpečný odpad, ale také cennou surovinu pro nové typy reaktorů pro jeho zpracovávání uzpůsobených.

Konvenčnější metodou zacházení s vyhořelým palivem je jeho přepracování. Existuje množství metod pro oddělení a recyklaci složek vyhořelého paliva. Nejznámější metodou je proces PUREX (Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction), kdy se palivo po odstranění obalu rozpustí v kyselině dusičné a plutonium a uran se extrahují organickým rozpouštědlem (roztokem tributylfosfátu v kerosenu). Existují různé modifikace tohoto procesu (UREX, pro extrakci pouze uranu za účelem jeho recyklace a zmenšení objemu radioaktivního odpadu pro trvalá úložiště, TRUEX, umožňující zároveň extrakci americia a curia a tím ztěžující eventuelní diverzi plutonia pro zbraňové účely a zároveň snižující dlouhodobou radioaktivitu jaderného odpadu, a DIAMEX, modifikace TRUEX bez použití materiálů obsahujících fosfor nebo síru a umožňujících spálení odpadu bez produkce kyselin). Další modifikací je proces UNEX, vyvinutý v Rusku a České republice, umožňující extrakci stroncia, cesia a aktinoidů jiných než uran a plutonium z materiálu zbylého po extrakci procesem PUREX.

Jsou vyvinuty i novější metody přepracování, technicky výhodnější než metody extrakční. Z politického hlediska je v současnosti přepracování paliva poněkud nepopulární a v místech, kde je přepracování používáno, jsou již postaveny provozy PUREX. Díky absenci poptávky se tedy novější metody zatím takřka nevyužívají. Eventuelní nasazení reaktorů čtvrté generace však může potřebnou poptávku vytvořit.

Nové metody operují obvykle za vysokých teplot, s použitím roztavených solí jako rozpouštědel pro extrakci či elektrolytu pro elektrolytickou rafinaci. Jejich výhodami jsou možnost použít čerstvější vyhořelé palivo (procesy probíhají za vysokých

teplot, řádově stovek °C, a produkce tepla palivem tedy není na závadu), představují nižší riziko nehody způsobené nechtěným dosažením kritického množství štěpného materiálu (vzhledem k absenci vodíku a uhlíku v použitých vysokoteplotních rozpouštědlech, která by jinak mohla plnit funkci moderátoru a zmenšovat konfiguraci kritického množství), umožňuje separaci tritia a uhlíku-14 (které by se z vodných a organických materiálů nedaly dostat a zvyšovaly tak objem nízkoaktivního odpadu), mnohem menší velikost nutné aparatury a tedy možnost přepracování přímo v areálu elektrárny a eliminaci technických a politických problémů spojených s přepravou vyhořelého paliva, a získání všech aktinoidů najednou, čímž vzniká silně radioaktivní nové palivo které se obtížně krade, nejde snadno použít k výrobě jaderných zbraní, a dá se spálit v rychlých reaktorech, schopných štěpit i ostatní aktinoidy.

5.2 Prevence havárií

Černobylská havárie, přestože se neprávem stala symbolem nebezpečnosti jaderné energetiky, se vyznačovala mnoha specifiky. Reaktor typu RBMK je moderovaný grafitem, který je hořlavý. Při destrukci reaktoru a průniku vzduchu do rozžhaveného jádra může dojít k požáru. Intenzivní oheň pak může uvolňovat do ovzduší radionuklidy ve formě plynů, plynných oxidů, odpařených těkavých látek (např. oxidy, hydroxidy a soli alkalických kovů, zejména cesia, nebo halogenidů, zejména jódu), a prachových částic, z nichž některé mohou pocházet z nitra zničených palivových tyčí a tedy být silně radioaktivní. Zde je vhodné připomenout, že ke stejným jevům dochází i v klasických uhelných elektrárnách. Uhlí z některých lokalit obsahuje stopová množství radionuklidů, které se při jeho spálení dostanou do popílku, ve kterém se koncentrují. Jejich část pak uniká do atmosféry. Další riziko pak představuje popílek samotný - může dojít k haváriím, při kterých dojde k jeho úniku a uvolnění látek, které obsahuje (včetně radionuklidů a těžkých kovů) do biosféry. Radioaktivita, včetně produkce radonu - plynného, inertního radioizotopu - pak může činit problémy v objektech vystavených z materiálů, např. tvárnic, vyrobených s podílem tohoto popílku.

6. Závěr

Ve své práci jsem chtěla jako laik porovnat bezpečnost jaderných a nejaderných elektráren, jejich vliv na životní prostředí a zamyslet se na tím, co bude pro obyvatele naší planety bezpečnější a perspektivnější.

V době, kdy dojde k nutnosti nahrazovat elektrárny využívající ropu nebo zemní plyn jinými zdroji, bude velmi pravděpodobně, že země OECD se kvůli ekologickým cílům spíše než k uhlí, které zůstane tou dobou nejspíše stále relativně levné, přikloní k jiné alternativě. Kromě obnovitelných zdrojů, které získají svými nízkými cenami a vývojem, ještě zvyšujícím efektivitu a atraktivitu obnovitelných zdrojů, tu snad bude ještě jaderná energie, jejíž využití v budoucnosti, vzhledem s rizikem nedokonalé bezpečnosti jaderných elektráren, lze těžko odhadnout. Rozvojové země budou však v této době pravděpodobně stavět uhelné elektrárny. Podle odhadů IEA vystačí zásoby zemního plynu asi o 20 let déle než ropy a u té se předpovídá vyčerpatelnost asi za 50 let. Pokud by měla jaderná energetika plně nahradit ropu, zásoby uranu by vydržely podle některých propočtů asi jen na dalších 5 let. Naší nadějí bude vývoj technologie jaderné fúze, která by přinesla výrazně vyšší míru efektivitu, nižší ekologickou zátěž a rozhodně vyšší bezpečnost.

Budoucnost jaderné energetiky v České republice zůstává stále otázkou. Budeme to řešit jako v sousedním Německu, kde postupně odstavují jaderné reaktory a budují nové uhelné a plynové elektrárny, přesto, že stojí v čele zemí usilujících o radikální snížení emisí CO₂ a patří k největším výrobcům větrných a fotovoltaických elektráren? [20]

Nebo obhájíme dostavbu Temelína před ostatními zeměmi EU a především před občany Rakouska?

Na závěr bych použila citát Ing. Dany Drábové, Ph. D. „Nemusíme se bát ničeho na světě, pokud tomu rozumíme.“

Zkratky použité v textu

VHTR	Very-High Temperature Reactor System
WEC	World Energy Council
GIV	Generation IV International Forum
NGNP	Next Generation Nuclear Plant
HTGR	High Temperature Gas Cooled Reactor
SCWR	Super Critical Water Reactors
PWR	Pressurized Water Reactor
BWR	Boiling Water Reactor
MSR	Molten Salt Reactors
GFR	Gas-Cooled fast reactors
RBMK	Reaktor bolšoj moščnosti kanalnej
EPR	European Pressurized Reactor
MOX	Mixed oxide
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
TEPCO	Tokyo electric power company
EU	Evropská Únie
PUREX	Plutonium and uranium recovery by extraction
UREX	Uranium extraction
TRUEX	Transuranic extraction
DIAMEX	Diamide extraction
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
IEA	International energy agency

Seznam literatury

- [1]<http://lammps.sandia.gov/pdf/zimmerman.pdf>
- [2]http://zpravy.idnes.cz/fukusimou-otrasly-dalsi-vybuchy-a-japonsko-vydesil-unik-radiace-php-/zahranicni.asp?c=A110315_013410_zahranicni_ip
- [3]http://zpravy.idnes.cz/japonci-se-boji-radiace-zahnala-i-reportery-mf-dnes-fwi-/zahranicni.asp?c=A110315_125008_zahranicni_stf
- [4]http://zpravy.idnes.cz/japonci-pomoci-tekuteho-skla-zastavili-unik-radioaktivni-vody-z-fukusimy-1t0-/zahranicni.asp?c=A110406_070412_zahranicni_ip
- [5]http://zpravy.idnes.cz/japonci-pomoci-tekuteho-skla-zastavili-unik-radioaktivni-vody-z-fukusimy-1t0-/zahranicni.asp?c=A110406_070412_zahranicni_ip
- [6]<http://www.zdarbuh.cz/reviry/okd/katastrofa-na-dole-dukla-77-1961/>
- [7] The Honkeiko colliery disaster, 26 April 1942, Kirk V. Cammack, Natural Resources Section: Report – Vydání 29
- [8]<http://kucik.blog.idnes.cz/c/148260/Ropne-havarie-Fakta-a-hysterie.html>
- [9]<http://slon.diamo.cz/hpvt/2001/sekce/sanace/07/S07.htm>
- [10]<http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/index.php?akce=reaktor&idtypbloku=8>
- [11]<http://www.cez.cz/cs/uvod.html>
- [12]<http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/>
- [13]www.inl.gov/research/very-high-temperature-reactor/
- [14]http://nuclear.inl.gov/gen4/docs/scwr_annual_progress_report_gen-iv_fy-03.pdf
- [15]http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/FFR_chap11.pdf
- [16] ISBN 1-58603-696-3 (Improving fuel cycle design and safety characteristics of a gas cooled fast) Willem Frederik Geert van Rooijen
- [17]<http://www.geology.cz/aplikace/geohazardy/katalog/geohazard-46/>
- [18] ISBN 5-94442-013-8 Greenpeace, Amsterdam, the Netherlands, April 2006

[19]<http://www.worldenergy.org/publications/>

[20]<http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/nove-uhelne-elektrany-v-nemecku-obnovitelne-zdroje-nestaci.aspx>

[21]http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_hav%C3%A1rie

[22]http://zpravy.idnes.cz/japonci-zvazuji-pohrbit-fukusimu-do-betonoveho-sarkofagu-jako-cernobyl-1o7-/zahranicni.asp?c=A110318_074318_zahranicni_aha

[23]http://technet.idnes.cz/voda-vypustena-z-fukusimy-udela-misto-vode-jeste-radioaktivnejsi-1cv-/veda.asp?c=A110404_193848_veda_mla

[24]http://zpravy.idnes.cz/japonci-vypusti-tuny-radioaktivni-vody-do-oceanu-neni-jina-moznost-11o-/zahranicni.asp?c=A110404_113827_zahranicni_btw

[25]http://zpravy.idnes.cz/beton-fukusime-nepomohl-trhlinu-v-reaktoru-maji-zacelit-polymery-1c8-/zahranicni.asp?c=A110403_081042_zahranicni_wlk

Seznam obrázků

Obr. 1 generace v jaderné energetice z materiálu organizace „Gen IV international Forum“.

Seznam grafů

Graf č.1 Největší důlní neštěstí (počet obětí)

Graf 2 : Srovnání množství uniklé ropy do přírodního ekosystému (v milionech galonů)

Seznam tabulek

Tabulka č.1 (Výhody a nevýhody elektráren)

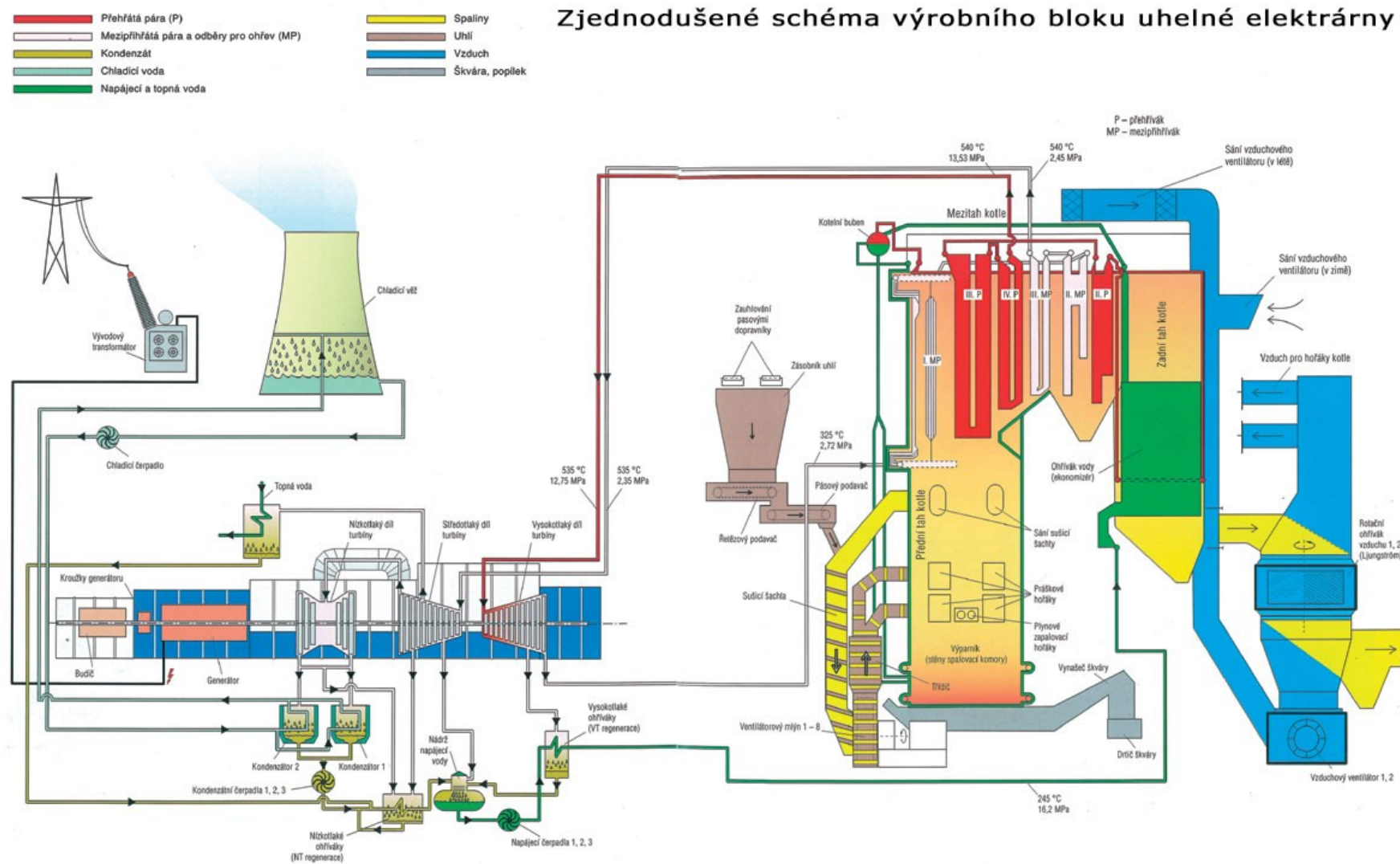
Seznam příloh

Příloha 1. (Zjednodušené schéma výrobního bloku uhelné elektrárny)

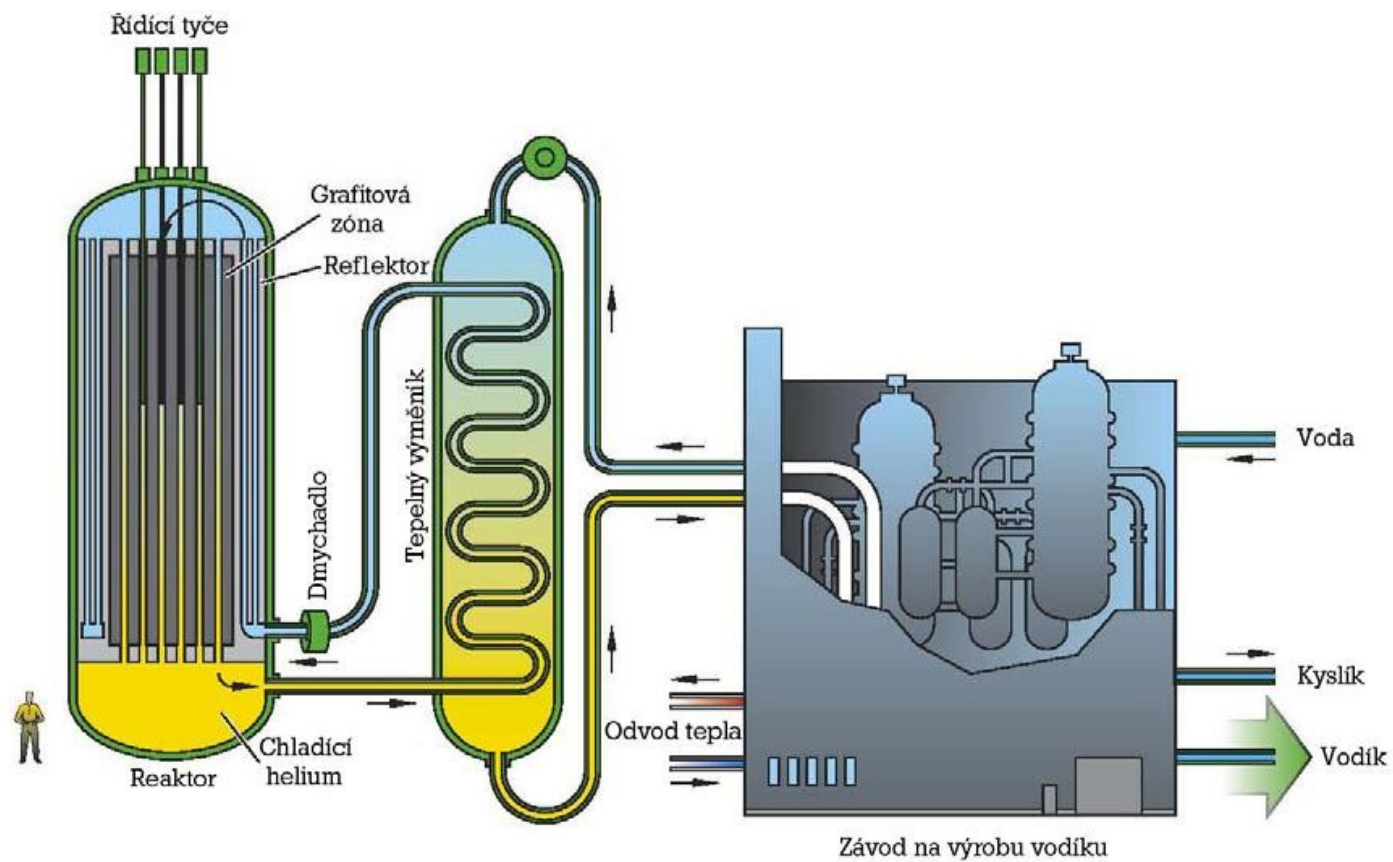
Příloha 2. Uspořádání systému VHTR (Very High Temperature Reactor)

Příloha 3. Uspořádání systému SCWR (Super Critical Water Reactors)

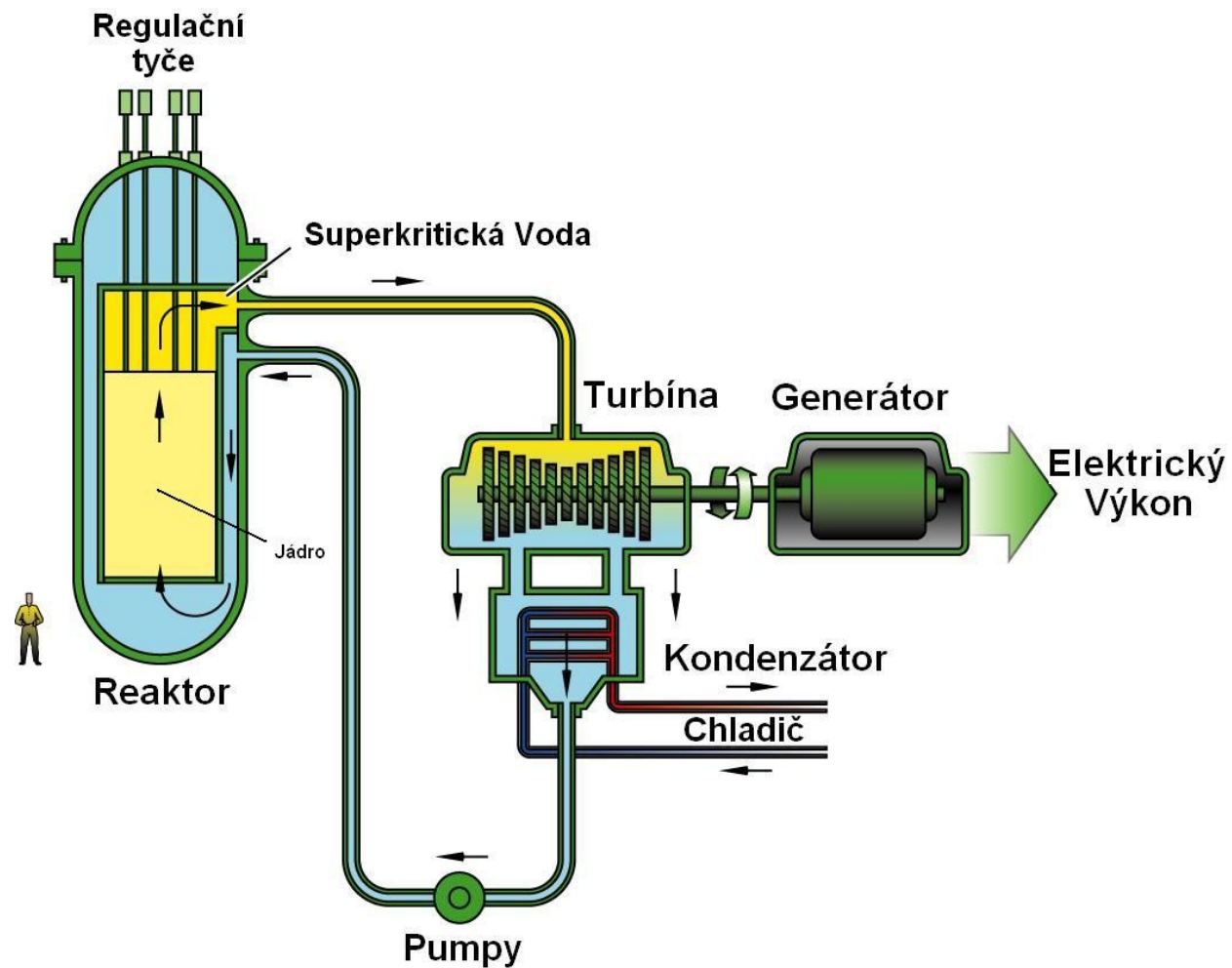
Příloha 4. Uspořádání systému MSR (Molten Salt Reactors)



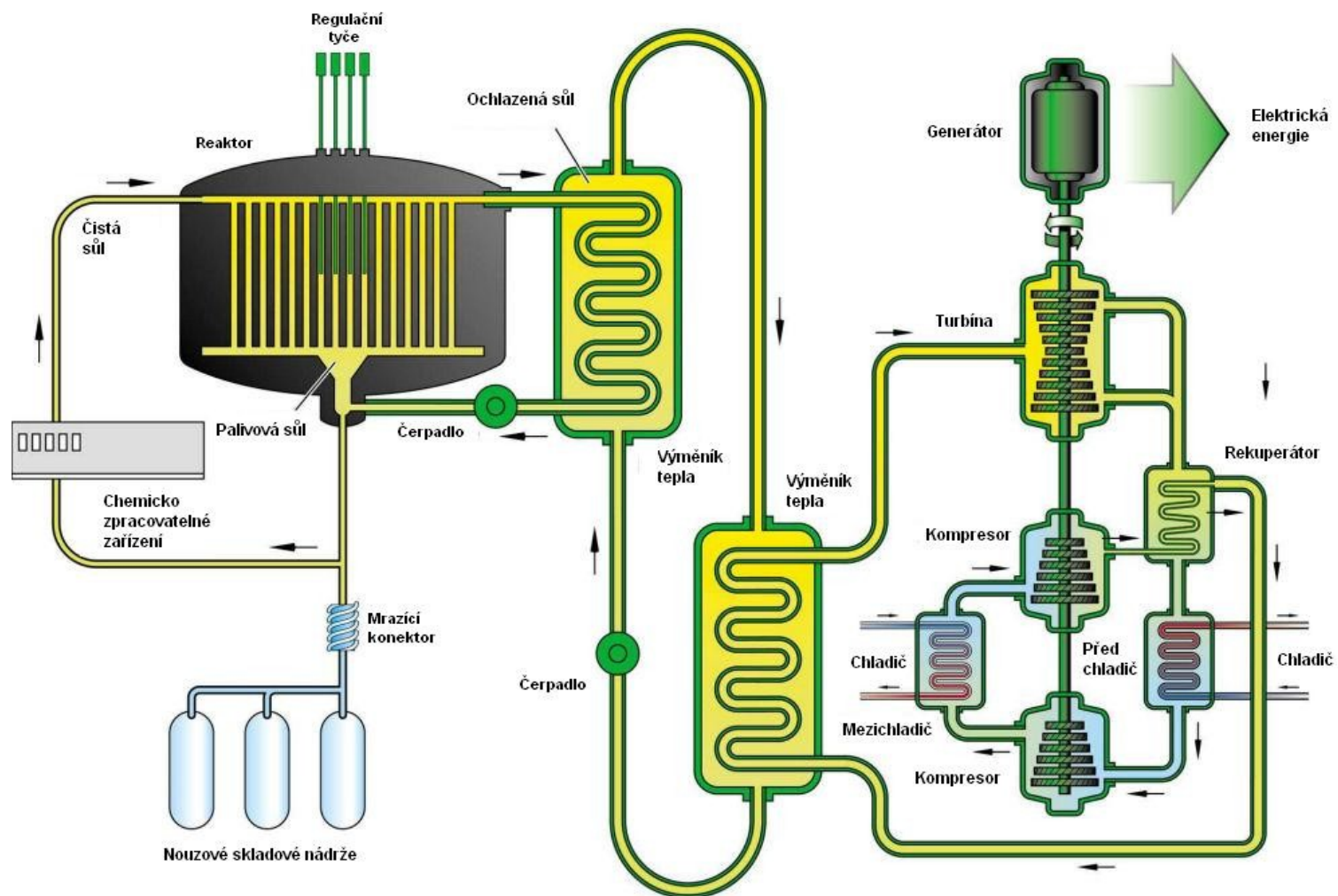
Příloha 1. (Zjednodušené schéma výrobního bloku uhelné elektrárny) zdroj: www.casopisstavebnictvi.cz



Příloha 2. Uspořádání systému VHTR (Very High Temperature Reactor)



Příloha 3. Uspořádání systému SCWR (Super Critical Water Reactors)



Příloha 4. Uspořádání systému MSR (Molten Salt Reactors)